This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

Google™ books

https://books.google.com

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

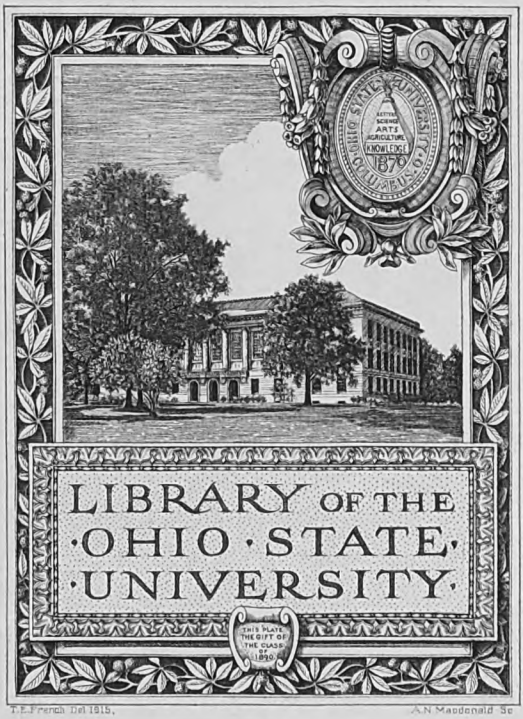
+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`



Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

OHIO STATE UNIVERSITY
NOV 5 1927
LIBRARY

TOME VII (4e SÉRIE) PRIX : 8 FR. N° 71. — JUILLET 1927

SGG Ser. 4 V.7

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886

Siège Social : 14, rue de Staël, PARIS

LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ

ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ

Étienne CHIRON, éditeur
40, rue de Seine, 40
PARIS

Digitized by Google

TK2
S66
Ser.A
v.C,pt.2

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Société reconnue d'utilité publique par décret du 7 Décembre 1886

SIÈGE SOCIAL :

12 et 14, Rue de Staël, Paris-15e

La Société est présidée alternativement par un Professeur de l'enseignement supérieur et par un Ingénieur ; elle est administrée par un Comité et par un Bureau renouvelables annuellement par tiers.

Elle publie, depuis 1884, un bulletin dont la collection embrasse toute l'histoire de l'électrotechnique et qui contient, outre les comptes rendus des séances publiques et des séances de sections, un écho des Sociétés étrangères.

Elle tient chaque année dix séances publiques où des conférences accompagnées d'expériences sont faites par ses membres les plus qualifiés, et une semaine de discussions où les principales questions à l'ordre du jour sont discutées et mises au point.

Les six sections de son Comité, ouvertes à tous les membres de la Société, étudient les principales questions électrotechniques. Leurs travaux servent de base aux cahiers des charges élaborés par les Groupements syndicaux.

Elle a créé, en 1924, un *Groupe Sud-Est* (Grenoble, Lyon, Saint-Etienne) et un *Groupe Sud-Ouest* (Bordeaux, Toulouse).

Elle organise, pour ses Membres, des visites d'usines, voyages en France et à l'Étranger.

Elle a fondé :

En 1888, *le Laboratoire Central d'Electricité* consacré aux recherches techniques et aux essais industriels, 14, rue de Staël, à Paris.

En 1894, *l'Ecole Supérieure d'Electricité*, 14, rue de Staël, à Paris, qui assure aux ingénieurs, par ses diverses branches, un enseignement électrotechnique supérieur, un enseignement spécialisé de radiotélégraphie et un enseignement spécialisé d'éclairage.

La Société a contribué à la création, en 1925, de la Société pour favoriser le développement du haut enseignement de l'électrotechnique en France. Cette dernière Société a pour objet de contribuer à l'organisation matérielle du haut enseignement scientifique et technique de l'électricité en France, dans les colonies françaises et pays de protectorat, et d'apporter son concours à l'industrie française pour la création et le développement d'un centre de haute culture électrotechnique.

Conditions d'admission : Être présenté par deux parrains membres de la Société ; verser une cotisation annuelle (80 francs pour les Membres individuels, 160 francs pour les Sociétés et Groupements scientifiques et industriels, 40 francs pour les Élèves en cours d'études dans un Établissement supérieur d'enseignement électrotechnique et pendant les trois années qui suivent leur sortie de l'école). Il est réclamé, en outre, 20 francs de frais supplémentaires de correspondance pour les membres résidant à l'Étranger.

Pour les demandes d'admission et tous renseignements, s'adresser au siège social.

La reproduction des mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des Auteurs.

Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant le manuscrit.

Digitized by Google

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du Mercredi 6 Juillet 1927, p. 728.
Admission de membres titulaires, p. 728.
Don au Laboratoire Central d'Electricité, p. 729.
Distinctions accordées aux membres de la S. F. E., p. 729.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

L'électrification des campagnes en Suède (M. le Dr EKSTROM), p. 732. — L'électricité à la ferme (M. BORLASE MATTHEWS), p. 786. — L'électrification rurale dans la région Parisienne (M. BITOUZET), p. 792. — Progrès récents aux Etats-Unis dans la transmission à haute tension par les lignes aériennes (M. WHITEHEAD), p. 797. — Note technique sur la visite des installations électrifiées des Mines du Nord et du Pas-de-Calais (M. DROUIN), p. 800.

TRAVAUX DES SECTIONS :

Sommaire, p. 807. — Texte, p. 807.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 833.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 835.

IL Y A TRENTE ANS, p. 838.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

4e série, tome VII, n° 71.

341647

Digitized by Google

COMPTES RENDUS DES REUNIONS

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Mercredi 6 Juillet 1927.

PRÉSIDENCE DE M. CH. FABRY

La Séance est ouverte à 20 h. 30

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes:

Andrade Filho (Henrique), ingénieur en charge des Sous-Stations de la S. Paulo Tramway, light et Power Cº Ltd., Alameda Nothmann, 25, S. Paulo (Brésil). — Présenté par MM. Parodi et Mauduit.

Anjot (Roger-Pierre), ingénieur chez MM. Schneider et Cie (Service montages extérieurs), 32, rue Grande, à Champagne-sur-Seine (Seine-et-Marne). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Armaingaud (Georges), directeur général technique de la Compagnie bordelaise des Produits chimiques, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. G. Rousseau et L. Rousseau.

Baudin (Blaise-Louis-Joseph-Georges), ingénieur Compagnie hydro-électrique d'Auvergne, 57, boulevard Gergovia, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme). — Présenté par MM. Chazollais et Jouvion.

Bergeret (Albert-Francisque), ingénieur principal du Matériel de la Compagnie P.-L.-M., 20, boulevard Diderot, à Paris (12e). — Présenté par MM. Bunet et Ferrand.

Bonnemain (Jean-Jacques-Louis), élève à l'E. S. E., 23, rue Cujas, à Paris (5e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bouchon (Pierre), administrateur-directeur de la Société électrique du Toulois, 15, rue du Ménin, à Toul (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. Grosselin et Jouvion.

Caminati (Carlo), ingénieur-conseil, Corso Vinzaglio, 11, à Turin (Italie). — Présenté par MM. Janet et Grosselin.

Chéron (Théophile-Gustave), ingénieur à la Compagnie Française Thomson-Houston, à Paris, 24, rue Sainte-Victoire, à Versailles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Girault et Deflassieux.

Cornudet (Paul-Léon-Marie-Joseph), ingénieur à la Société française d'Electricité A.S.E.A., 114, boulevard Haussmann. Domicile, 262, boulevard Saint-Germain, à Paris (8e). — Présenté par MM. Grosselin et Péridier.

Delbe (Etienne-Jean-Noël), ingénieur-électricien aux Mines de Nœux, à Nœux-les-Mines (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Grosselin et Mathivet.

Delbourg (Emile-Emmanuel), ingénieur aux Arts et Manufactures, Agent de la Société alsacienne de Constructions mécaniques, 5, quai Sainte-Croix, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Delasalle et L. Rousseau.

Delton (Henri-François), 9, rue Pelouze, à Paris (8e). — Présenté par MM. P. Bunet et L. Lorin.

Deschamps (M.), ingénieur aux Ateliers de Delle, 25, chemin de Cyprian, à Lyon-Villeurbanne (Rhône). — Présenté par MM. Dumont et Fauconneau.

Detœuf (Auguste), directeur général de la Compagnie française Thomson-Houston, 173, boulevard Haussmann, à Paris. — Présenté par MM. Girault et Lartigue.

Dumas (Jean-Jacques), élève à l'E. S. E., 11, rue de Pétrograd, à Paris (8e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Digitized by Google

Dumas (Albin), administrateur-directeur général du Journal « Le Génie Civil », 11, rue de Pétrograd, à Paris (8e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Institut National Roumain pour l'étude de l'aménagement et de l'utilisation des sources d'énergie, rue Matei Millo, 2, à Bucarest (Roumanie). — Présenté par MM. C.-D. Busila et C.-I. Budeanu.

Jacoby (Jean), ingénieur I. E. G., au Service technique de l'Est-Lumière, 7, rue de Saintonge, à Paris (3e). — Présenté par MM. Gros et David.

Japiot (Marcel-Louis-Jean), ingénieur en chef adjoint du matériel et de la traction des Chemins de fer P.-L.-M., 171, boulevard du Montparnasse, à Paris (6e). — Présenté par MM. Bunet et Bachellery.

Lange (Charles-Joseph-Alexandre), ingénieur en chef des P. T. T., directeur du Service des Lignes souterraines à grande distance, 8, rue Dangeau, à Paris (16e). — Présenté par MM. Le Corbeiller et Bizet.

Larrive (Alexandre-Henri), ingénieur-mécanicien marine nationale, en stage d'études à à l'E. S. E., à Vignieu (Isère). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Liouville (Robert), 106, avenue de Villiers, à Paris (17e). — Présenté par MM. Grosselin et Jouvion.

Machado de Oliveira Filho (Octaviano), sous-ingénieur (Section d'Etudes et Recherches Electriques. The S. Paulo Tramway Light et Power Co Ltd. S. Paulo (Brasil) (Caixa do Correio « a »). Domicile, 32, Alameda Ribeirao Preto S. Paulo (Brasil). — Présenté par MM. Mauduit et Parodi.

Mayer (Maurice-Daniel-Georges), directeur-adjoint de la Maison Bréguet, 48, avenue de la Motte-Picquet, à Paris. — Présenté par MM. Callou et Gratzmuller.

Munch (Eugène), ingénieur à la Compagnie générale de télégraphie et de téléphonie, 176, avenue Daumesnil, à Paris (12e). — Présenté par MM. Colemonts et Iglésis.

Munier (Adolphe), directeur central de Beuvry (Compagnie des Mines de Vicoigne, Nœux et Drocourt), à Sailly-Labourse (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Grosselin et Mathivet.

Poisot (André), élève à l'E. S. E., 52, rue Thiers, à Beaune (Côte-d'Or). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Roma Coelho da Silva (Péry), ingénieur-chef de la Section d'Etudes et Recherches Electriques. The S. Paulo Tramway Light et Power Co Ltd. Caixa do Correio « a » S. Paulo (Brasil). Domicile Hôtel da Paz S. Paulo (Brasil). — Présenté par MM. Mauduit et Parodi.

Semet (Henri), directeur de la Société française des Régulateurs Universels Arca, 164, rue de la Croix-Nivert, à Paris (15e). — Présenté par MM. Grosselin et M. Mathieu

Sidi-Léon (Georges), directeur des Etablissements E. Sidi-Léon, 86, rue de Grenelle, à Paris. Domicile : 29, rue d'Arlois, à Paris (8e). — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.

Souza (Edgard-Egydio), professeur à l'Ecole Polytechnique de S. Paulo, Caixa, 162, à S. Paulo (Brésil). — Présenté par MM. Mauduit et Parodi.

Whitehead (John B.), doyen de l'Ecole des Ingénieurs, Université Johns Hopkins Baltimore, Maryland (U. S. A.), 19, W. Cold Spring Lane, à Baltimore Md. (U. S. A.). — — Présenté par MM. Janet et Grosselin.

Ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société Française des Electriciens.

M. le Président annonce que les Anciens Etablissements Sautter-Harlé ont fait don au Laboratoire Central d'Electricité, d'un appareil imaginé par le personnel de ce Laboratoire, pour l'étude de la répartition de l'intensité lumineuse des réflecteurs, et adresse à ces Etablissements les remerciements de la S.F.E.

Il remercie également les donateurs des ouvrages offerts dont la liste est donnée dans le présent bulletin.

M. Janet demande la parole pour exprimer à M. Fabry les plus vives félicitations de la Société, à l'occasion de son élection à l'Académie des Sciences, élection qui a réuni la quasi unanimité des suffrages.

Il rappelle que si la Société comptait déjà parmi ses anciens Présí-

Digitized by Google

dents 12 Membres de l'Institut, c'est la première fois que le Président en exercice entre à l'Académie des Sciences.

Il est heureux de voir ainsi rendre un éclatant hommage aux remarquables travaux et aux éminentes qualités du physicien qu'est M. Fabry.

M. le Président remercie M. Janet, et ajoute que son principal titre comme électricien est celui de Président de la Société.

Il donne la parole à M. Maurice Leblanc qui fait un exposé d'ensemble sur les Recherches scientifiques dans l'Industrie en dehors des Laboratoires.

Il rappelle que les Laboratoires de science pure, rendent à l'Industrie un inappréciable service, mais que la prospérité de celle-ci n'est assurée que si elle procède elle-même à des expériences méthodiques dans ses propres Laboratoires.

Il indique les conditions dans lesquelles ce travail doit être organisé, tant au point de vue du personnel employé que des méthodes appliquées.

M. Darmois fait ressortir les différences existant entre les méthodes employées dans les Laboratoires de science pure et celles appliquées dans l'Industrie. Dans les premiers, l'objet des recherches et le temps que l'on y consacre sont loin d'être aussi strictement limités que dans les seconds ; au contraire, les méthodes et la précision des mesures sont les mêmes dans les deux cas.

M. Leaute expose le rôle de la Société de Recherches et Perfectionnements Industriels qu'il a créée afin de permettre à l'Industrie, d'une part de faire exécuter des recherches sur une échelle convenable et, d'autre part, de bénéficier d'une documentation assez complète pour éviter de reprendre des travaux déjà faits.

M. Gratzmuller rappelle les principales recherches faites par les Sociétés françaises de construction électrique qui se sont affranchies de la superstition des travaux étrangers.

M. Darrieus énumère les principaux résultats obtenus dans les laboratoires de la Société Brown Boveri, notamment pour la construction des turbines à vapeur.

M. Ducleac fait le même exposé pour les travaux de la General Electric Company et fait circuler des photographies des Etablissements et des Laboratoires de cette Compagnie puissante.

M. Imbs énumère les principales inventions réalisées par le personnel de la C.P.D.E. et des autres Sociétés de production d'électricité.

M. Fabry remercie tous les rapporteurs et ajoute qu'il a rapporté de

Digitized by Google

sa visite au Laboratoire de Schenectady, l'impression que ces Etablissements entreprennent non seulement des travaux industriels, mais aussi des recherches de science pure et que le brillant Etat Major des Cooldige, Wethney, Langmuir, etc... considère que tout doit être essayé puisque finalement tout arrive à payer.

Il regrette que nos Sociétés industrielles françaises ne puissent disposer des énormes capitaux américains qui leur permettraient de faire aboutir, elles aussi, un grand nombre de travaux et d'inventions du plus haut intérêt.

La Séance est levée à 23 h. 35.

Digitized by Google

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS

L'ÉLECTRIFICATION DES CAMPAGNES EN SUÈDE[1]

PAR ALFRED EKSTROM
Docteur ès sciences

Etudes préléminaires. — Applications à la ferme - Cuisine. — Tarif tarif suédois à 3 parties.

Introduction.

L'importance de la production et de la distribution de la force électrique est telle qu'il conviendrait de l'étudier, en s'inspirant des intérêts généraux de chaque pays considéré comme une vaste unité, indépendamment des considérations accidentelles de propriété et d'intérêts économiques particuliers.

Il ne convient d'électrifier un pays, en tout ou en partie, que pour autant que cette mesure se justifie économiquement. On pourra, il est vrai, être amené à l'envisager pour des raisons sociales. Nous ne nous arrêterons pas à ce côté particulier du problème.

La centralisation de la production d'énergie électrique et de sa transmission à d'importantes industries, à des villes et à des régions rurales, est subordonnée à la condition essentielle et déterminante d'abaisser le prix de l'énergie chez le consommateur. D'autres considérations peuvent entrer en ligne de compte. Dans les pays dépourvus de charbon, tels que la Suède, l'Irlande, la Suisse et l'Autriche, l'exploitation des forces hydrauliques affranchit le pays, dans une mesure aussi large que possible, de la nécessité d'importer du combustible. Elle ne se justifiera pourtant que si l'énergie ainsi produite, est d'un prix inférieur à celle que produirait le combustible importé.

Il est relativement simple de dresser les plans d'un vaste système de production et de distribution d'énergie électrique pour les grandes industries, les villes et les agglomérations importantes. Il est assez facile d'évaluer les prix que les consommateurs sont capables de payer s'ils ferment leurs propres installations, ou ne les utilisent que comme réserve.

Il est beaucoup plus malaisé de calculer la balance des considéra-

(1) Communication présentée à la *Société Française des Electriciens*, le 4 mai 1927.

Digitized by Google

tions économiques pour l'électrification des campagnes. Si l'on négligeait toutefois, en dressant les plans d'un système de production et de distribution, les dispositions en vue de pourvoir aussi aux besoins des régions rurales environnantes, on commettrait une erreur funeste.

I. — Sources d'énergie.

Toute électrification rationnelle exige un inventaire préalable des sources d'énergie existantes. Celles-ci doivent être graduellement reliées au système, de manière à maintenir le prix de l'énergie produite à un prix aussi bas que possible.

Le meilleur résultat économique est obtenu généralement, lorsque les diverses sources d'énergie coopèrent de la façon la plus appropriée à leur caractère particulier. En d'autres termes, il s'agit d'établir une coopération rationnelle entre les divers systèmes d'usines hydro-électriques et d'usines thermiques.

II. — Evaluation de la consommation d'énergie.

La consommation d'énergie dépend du nombre des habitants, de leurs revenus et du genre de vie, du climat, du caractère et de l'importance des usines à desservir, etc.

Ces différentes conditions se reflètent plus ou moins distinctement dans les données statistiques, concernant une région ou un pays déterminé. Il est bon de les comparer à celles des pays où l'électrification a fait les progrès les plus importants, et spécialement de ceux qui présentent des conditions d'existences analogues.

Il ne suffit pas d'évaluer la consommation totale en kilowatts et les époques de la consommation, il faut de plus établir, pour les différentes sortes de consommation, une courbe de charge suivant les heures, les jours, les semaines.

Il faut aussi tenir compte dans ce calcul, de l'échelle des taxes qui pourront éventuellement être appliquées.

Souvent les consommateurs éloignés et isolés ne peuvent être rattachés au réseau, si l'électrification doit être économiquement rationnelle. La seule chose que l'on puisse faire est de dresser les plans de manière à permettre un rattachement facile, le jour où la demande d'énergie sera assez augmentée pour justifier l'opération.

A notre époque, il y a une tendance marquée à mettre la puissance mécanique en proportion croissante à la disposition de la main-d'œuvre et, en général, par l'électrification. Maints besoins d'énergie ne seront révélés que par l'électrification.

Digitized by Google

C'est tout spécialement *le métier de l'artisan et la petite industrie* qui trouvent des possibilités de développement nouvelles, dès que le moteur électrique peut venir à leur aide, et le développement des métiers et de la petite industrie peut acquérir, par suite, une importance économique prédominante pour l'électrification.

Dans le monde civilisé tout entier, l'*agriculture* travaille aujourd'hui dans des conditions extrêmement difficiles. Le seul remède efficace à cette situation se trouve certainement en premier lieu dans la mécanisation et l'électrification de l'agriculture.

Enfin, l'introduction et l'emploi croissant de l'électricité dans *la vie domestique*, constituera sans nul doute une des tâches les plus bienfaisantes du plus prochain avenir.

Tout concourt donc à l'accroissement de la consommation.

III. — Régions rurales électrifiables et non-électrifiables.

Lorsqu'on parle d'électrification des régions rurales, il est nécessaire de distinguer au point de vue économique entre les régions électrifiables et celles qui ne le sont pas.

Depuis que l'on fabrique des moteurs à combustion intérieure d'un rendement élevé et de petites dimensions, l'agriculture et la petite industrie rurale disposent à bon marché d'une force motrice relativement sûre.

On ne peut donc guère songer à électrifier les petites fermes isolées, ni celles plus importantes qui peuvent employer des moteurs mécaniques. Si plusieurs de ces consommateurs d'énergie sont voisins les uns des autres, l'installation d'une production centralisée et d'un réseau de distribution sera avantageuse. En pareil cas, tous les petits consommateurs voisins pourront aussi, en général, avoir accès à l'électricité. Malgré le peu d'importance de leur consommation, les frais supplémentaires requis sont si faibles que l'électricité est moins coûteuse pour eux que la lampe à paraffine et que le moteur à combustion interne. C'est ainsi qu'ont surgi les usines électriques municipales. Mais les mêmes conditions sont également applicables aux gros villages.

Toutefois, si, à l'occasion de cette électrification financièrement permise, la question se pose d'électrifier des parties qui ne peuvent se procurer des machines séparées, ni recourir à une usine locale, la solution sera plus difficile.

Un groupe de fermes situées à une si grande distances les unes des autres, que les frais du réseau local nécessaire sont à eux seuls presque

Digitized by Google

égaux à la valeur de l'énergie produite au moyen de lampes à paraffine et de moteurs à combustion interne, est incapable de supporter le fardeau des dépenses de production d'énergie dans une petite usine. Une telle région n'est, par conséquent, pas électrifiable. Mais s'il existe déjà un réseau rural et un réseau local, ou si l'on a dressé déjà les plans de ces réseaux, il n'est pas impossible que les frais supplémentaires soient assez bas pour que l'énergie rendue à domicile du consommateur soit capable de soutenir la concurrence, et ces régions deviennent électrifiables.

Si nous voulions essayer toutefois de pousser l'électrification plus loin, et de faire payer aux régions à situation favorable des prix plus élevés que ceux économiquement justifiés, pour en affecter le surplus à l'extension du réseau à d'autres régions, nous commettrions une erreur financière.

Le prix de revient de l'énergie diminue considérablement si, quand on crée une usine pour les besoins des industries et des villes, on lui donne assez d'importance pour répondre aussi à la demande des campagnes. Si nous admettons maintenant que les industries et les villes payent le prix plus élevé correspondant au prix de revient, dans le cas où l'usine aurait été établie pour subvenir uniquement à leurs propres besoins, nous serons en mesure de faire payer aux stations secondaires un prix beaucoup plus bas pour l'énergie nécessaire aux campagnes.

Nous pouvons aussi nous demander s'il n'y a pas un si grand avantage national à ce que les campagnes soient électrifiées, que les régions rurales dussent être mises en mesure de se procurer l'énergie, non suivant le principe du prix de revient moyen, mais d'après celui des « frais supplémentaires ».

En pareil cas, la superficie de la région rurale électrifiable peut être considérablement accrue.

IV. — Questions d'organisation relatives a la production et a la distribution de l'énergie électrique.

Du point de vue technique, tout le processus de la production et de la distribution depuis la chute d'eau ou la mine de charbon jusqu'à la lampe, le moteur ou l'appareil de chauffage du consommateur, constitue une seule unité économique. Sur la question de savoir s'il devrait constituer une unité administrative, les opinions sont partagées. Les usines électriques urbaines admettent généralement comme un fait allant de soi que la réponse doit être affirmative. Dans la mesure

Digitized by Google

même où s'est développée la production sur une large échelle, très spécialement par suite de l'exploitation des forces hydrauliques, il s'est interposé dans certains endroits, entre le producteur et le consommateur d'électricité, des entreprises intermédiaires. Dans les cas où ces entreprises sont si petites — quelques dizaines ou centaines de kilowatts — qu'elle ne sauraient comporter un personnel administratif et technique réellement qualifié, elles sont certainement préjudiciables au développement de l'électrification. La crainte qu'une entreprise ne soit pas en mesure de servir avantageusement quelques centaines de mille abonnés n'est pas fondée. Les machines modernes de comptabilité et les appareils analogues, permettent de simplifier à tel point la tenue des livres et d'en réduire le coût dans une si forte mesure, que cette question ne devrait pas s'opposer à l'organisation de tout l'ensemble en une seule entreprise.

Lors même qu'une seule entreprise pourrait être constituée ainsi, il conviendrait évidemment de rechercher s'il serait avantageux d'organiser la production d'énergie et les principales lignes de transmission en une entreprise, et de confier la distribution et la vente de l'énergie à une entreprise spéciale, en donnant à l'une et à l'autre un champ d'opérations suffisamment étendu.

A la question d'organisation se rattache, dans une certaine mesure, celle de l'exploitation par l'Etat ou la commune, ou par des entreprises privées. Le choix de l'exploitation par l'Etat est généralement dicté, non par des motifs économiques ou techniques, mais par des raisons politiques. Il suffira de constater ici qu'un département ministériel n'est pas un organisme approprié par lui-même pour s'occuper de l'électrification, en s'inspirant de l'esprit des affaires et de méthodes réellement économiques. Si donc l'Etat doit être appelé à se charger de la tâche, il sera nécessaire de procéder à des études sérieuses, afin que l'exploitation conserve les avantages des entreprises privées et qu'elle soit indépendante à l'égard du Gouvernement et du Parlement.

V. — L'ÉLECTRIFICATION DE LA SUÈDE, NOTAMMENT DE LA SUÈDE MÉRIDIONALE.

En Suède, par suite de la fusion ou de la coopération de petites entreprises électriques, la fourniture de courant s'effectue aujourd'hui par de grandes Centrales électriques. Cette concentration permet d'utiliser les avantages du système d'interconnection à très haute tension.

Il existe actuellement en Suède deux de ces entreprises dominantes :

Digitized by Google

l'une possédée par l'Etat, l'Administration Royale des Chutes d'Eaux, dans le centre du pays, et l'autre dans le sud, appartenant à la Société d'Electricité de la Suède méridionale.

La première, qui a deux grandes usines hydro-électriques à Trollhättan et à Alvkarleby, celle-ci complétée par la suite par l'usine hydro-électrique de Motala et par l'usine à vapeur de Vesterås, fournit d'électricité toute la Suède centrale.

La Société d'Electricité de la Suède méridionale, née de la fusion de trois grandes sociétés du sud de la Suède, distribue l'électricité produite par une vingtaine d'usines hydrauliques et quelques usines à vapeur, aux régions méridionales du pays.

Ces deux grandes entreprises coopèrent l'une et l'autre, d'ailleurs, avec un certain nombre d'autres petites ou grandes sociétés productrices d'électricité, financièrement indépendantes.

Par le moyen d'un câble posé dans le détroit du Sund, la Société d'Electricité de la Suède méridionale est également connectée avec le Danemark, coopérant ainsi avec Copenhague et avec le réseau de distribution de l'île de Seeland.

L'interconnection est assurée par le moyen de lignes de superforce

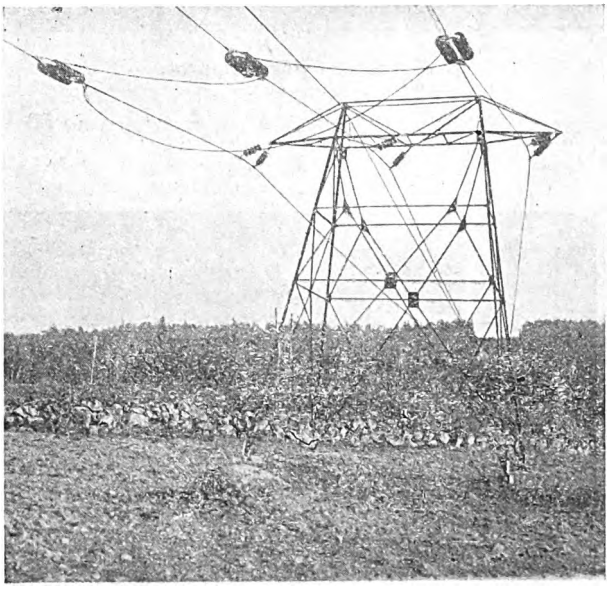


Fig. 1. - Pylône de transposition.

à 220 kV. La principale ligne de transmission fonctionne en général à 50 kV et à 50 p : s. Les fig. 1 et 2 montrent la façon dont ces

Digitized by Google

lignes ont été construites. La première représente une tourelle pourvue d'un dispositif pour la transposition des conducteurs, la seconde une tourelle-support.

En des points appropriés ont été érigées des *stations de transforma*

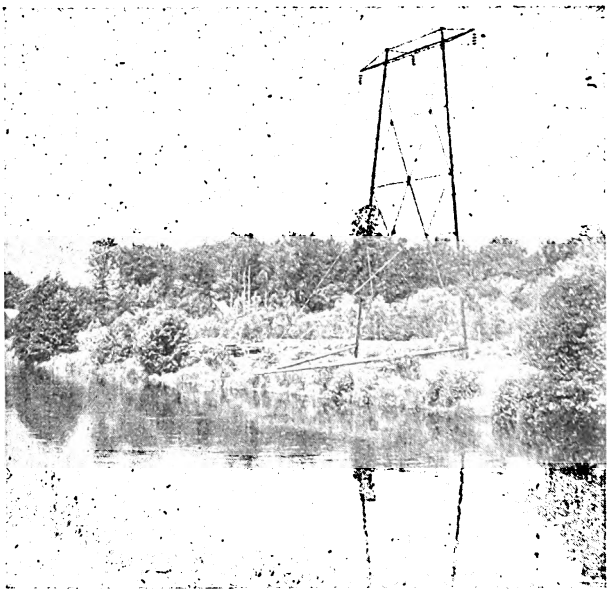


Fig. 2. — Pylône support.

teurs secondaires (fig. 3), où la tension est ramenée de 50 à 20 kV pour lignes rurales et à 6 kV pour les lignes urbaines. Les lignes rurales

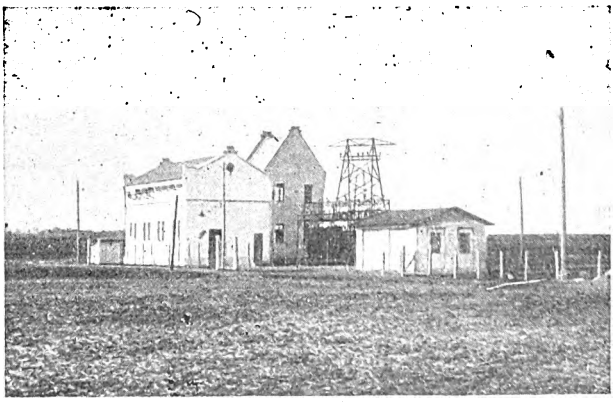


Fig. 3. Sous-station secondaire de transformation.

(fig. 4) de 20 kV partent de ces stations de transformateurs, dont chacune est destinée à distribuer le courant dans un rayon de 250 à 300 km.

Digitized by Google

L'énergie électrique fournie par les usines hydrauliques et livrée à haute tension aux bornes des transformateurs-élévateurs, est d'environ 1 500 millions de kilowattheures.

La tension actuelle de 50 kV est plutôt faible pour les grandes distances. La réactance entre les usines électriques les plus éloignées correspondra à une ligne de transmission de 50 kV de plus de 800 km. Néanmoins, l'exploitation parallèle et la stabilité du système, avec une capacité de 200 000 kVA, sont très satisfaisantes. Les difficultés que présente le réglage de la tension ont été résolues de façon ingénieuse par l'adoption de transformateurs pourvus d'un dispositif d'ajustage fonctionnant en charge. La longue ligne allant du nord-est au sud-

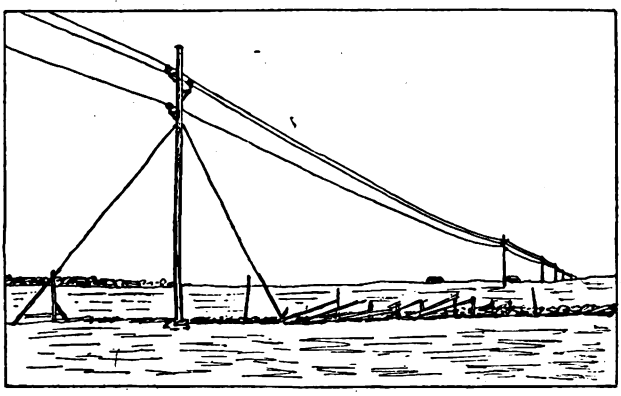


Fig. 4. — Ligne rurale de 20 kV.

ouest transmet à certaines époques de la force hydro-électrique du nord-est au sud-ouest et à d'autres le courant provenant d'une usine à vapeur, du sud-ouest au nord-est. Aux deux bornes, la tension doit être ajustée et portée de 45 à 60 kV en pleine charge. Pour obtenir une distribution rationnelle de la charge entre les différentes usines électriques et un rendement élevé des dites usines, il est appliqué d'intéressantes méthodes, trop compliquées pour pouvoir être exposées ici.

La première sous-station extérieure européenne a été établie dès 1913-1914 par la Société d'Electricité de *Hemsjö*, qui, en 1920, a été absorbée par la Société d'Electricité de la Suède méridionale. En connection avec les grandes lignes de transmission de cette région, il a été construit plusieurs de ces stations de commutation extérieures, qui peuvent soutenir la comparaison avec n'importe quelle autre construction du même genre en Europe ou en Amérique (fig. 5). Aucune

Digitized by Google

difficulté n'a surgi du fait du climat, des glaces, de la neige ou des

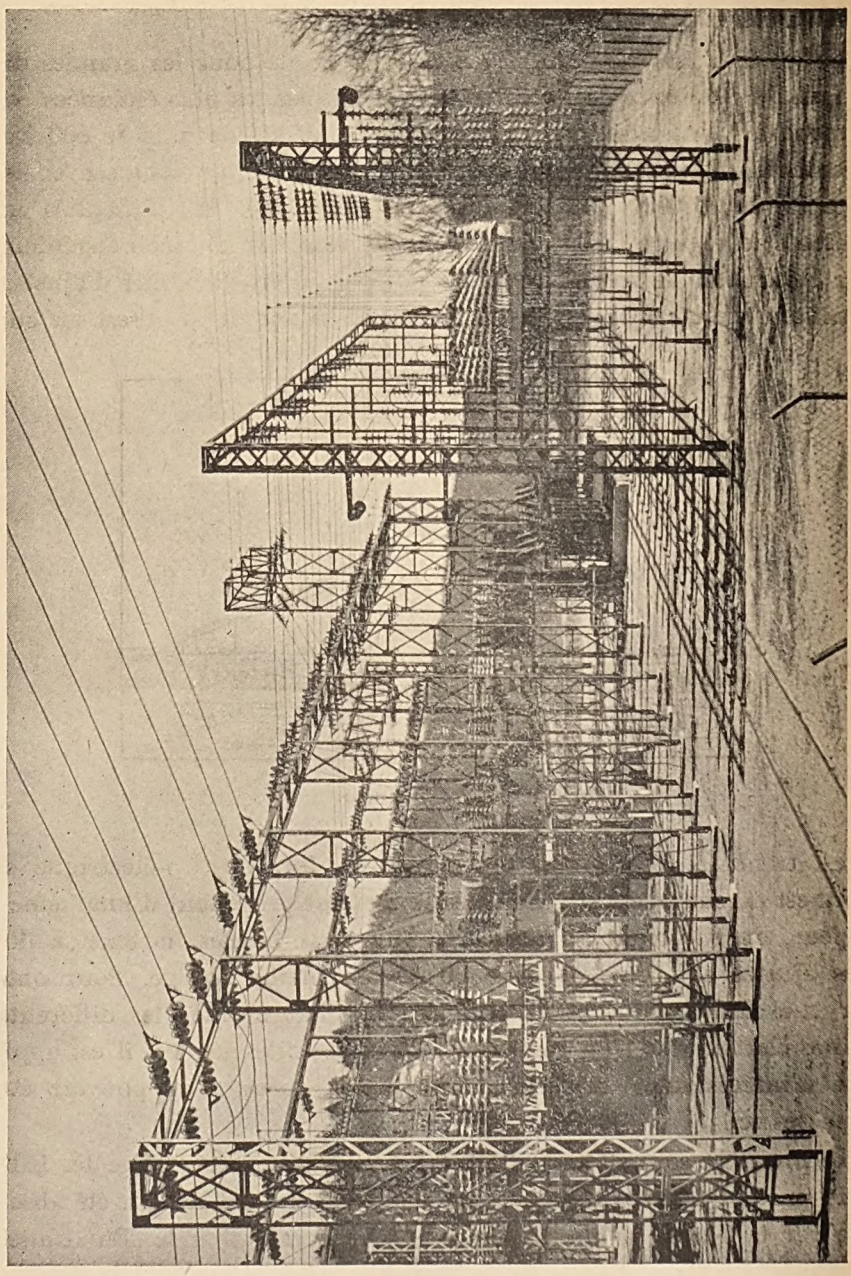


Fig. 5. — Sous station extérieure.

tempêtes, la sécurité du service est plus grande même qu'avec une station intérieure.

Digitized by Google

VI. — Le réseau local et ses transformateurs.

Les lignes rurales sont connectées avec les *stations de transformateurs tertiaires*.

Ces stations (20/3 ou 20/1, 5 kV) sont construites, soit sous forme de postes à pylônes, avec équipement extérieur, soit dans un petit bâtiment avec équipement intérieur (fig. 6).

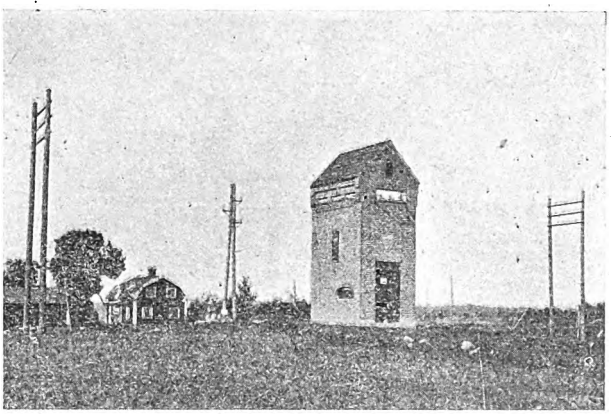


Fig. 6 — Stations de transformations tertiaires.

Les avantages du premier type sont les suivants :

1° la station de transformateurs à pylônes est facile à construire, sans l'aide d'ouvriers spéciaux et sans matériaux de construction spéciaux ;

2° les frais annuels d'entretien sont minimes ;

3° les frais initiaux d'établissement sont peu élevés en comparaison de ceux que nécessite la construction d'autres types de stations.

Le second type est plus avantageux dans les cas suivants :

1° quand l'énergie électrique doit être fournie et mesurée par la station de transformateurs tertiaires ;

2° dans les régions assez peuplées où rayonnent un grand nombre de lignes de transmission ;

3° dans les endroits où l'érection en plein air présenterait des inconvénients ou nuirait à l'aspect du site.

Ces considérations peuvent s'appliquer aussi aux stations de transformateurs quaternaires, alors même qu'il y aura rarement lieu d'employer dans ce cas un petit bâtiment de transformateurs.

En ce qui concerne la transmission sur le réseau local, le système de

Digitized by Google

l'Administration de l'Etat diffère de celui de la Société d'Electricité de la Suède méridionale.

Dans le premier de ces systèmes, toute l'énergie est transformée à 3 kV, et le réseau local s'étend aux différentes fermes. Là sont aménagés les *transformateurs quaternaires* (fig. 7), où la tension est généralement réduite de 3 000 à 380/220 volts, aussi bien pour les grands que pour les petits moteurs et pour l'éclairage. Dans certains

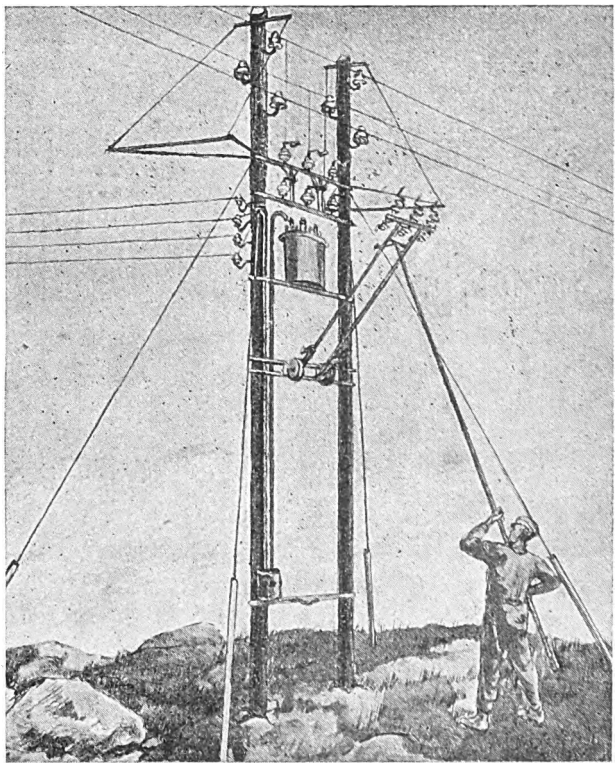


Fig. 7. — Station de transformation quaternaire sur pylône.

cas, toutefois, le transformateur quaternaire n'est que pour l'éclairage et les petits moteurs, tandis que les grands moteurs reçoivent le courant d'un transformateur transportable, directement connecté avec les ligne de 3 kV.

Dans le système de la Société d'Electricité de la Suède méridionale, la tension est portée à la station de transformateurs de 20 kV tout ensemble à 1 500 et à 220/127 V. Dans la région voisine la plus proche, où la consommation est généralement la plus forte, l'énergie destinée aux petits moteurs et à l'éclairage est livrée directement à 220/127 V,

Digitized by Google

tandis que celle à 1 500 V est employée pour les grands moteurs raccordés aux lignes de 1 500 V par un appareil spécial. Pour les consommateurs éloignés, les lignes de 1 500 V partent des stations de transformateurs tertiaires. Celles-ci utilisent aussi directement les 1 500 V pour les grands moteurs, mais pour les petits moteurs et pour l'éclairage, la tension est ramenée à 220/127 V dans les transformateurs quaternaires, établis pour chaque ferme ou un groupe de fermes. Cette disposition réduit considérablement les pertes sur les transformateurs et les lignes.

La fig. 7 représente un type de station de transformateurs quaternaires à pylônes, souvent employé en ces dernières années, en raison de ses qualités et de son excellente construction, avantages d'autant plus précieux que les ouvriers appelés à en assurer le fonctionnement ne sont souvent pas préparés à cette tâche. Il pourra donc paraître indiqué d'en donner ici une brève description.

Les stations de transformateurs quaternaires à pylônes comportent les parties suivantes :

a) *La partie de haute tension.*

Les lignes à haute tension sont raccordées aux trois isolateurs situés au sommet du pylône. Ceux-ci sont connectés avec 3 isolateurs horizontaux, sous lesquels sont disposés 3 autres isolateurs horizontaux, raccordés au bobinage à haute tension du transformateur. Entre ces deux rangs d'isolateurs, qui sont pourvus de contacts glissants, trois fusibles de haute tension, munis de couteaux aux deux bouts, sont disposés horizontalement sur un cadre mobile. Ces couteaux s'ajustent aux contacts glissants susmentionnés, raccordant ainsi les trois lignes d'arrivée à haute tension aux bobinages à haute tension du transformateur.

La fig. 7 montre le cadre descendant sur le sol, en vue du remplacement ou de la réparation des fusibles.

b) *La partie de basse tension.*

Aux bobinages à basse tension du transformateur, des câbles sous plomb sont raccordés au tableau de distribution des lignes de départ et placés, soit sur un pylône, soit entre les deux pylônes. Cette centrale est munie de fusibles et d'interrupteurs pour chaque ligne de départ à basse tension. Ces lignes sont amenées au sommet du pylône dans des câbles sous plomb et rayonnent de là jusqu'aux abonnés.

Digitized by Google

Le type de mât unique ne peut être employé qu'avec des transformateurs de 10 kVA au maximum.

L'avantage du cadre mobile consiste dans la facilité avec laquelle on peut, du sol, atteindre les fusibles lorsqu'ils ont besoin de réparation, sans avoir à grimper au pylône. Quand il se produit un défaut sur les lignes locales à basse tension, il est facile de déconnecter celles-ci au moyen du cadre mobile.

Ce type fonctionne d'une manière satisfaisante, même en cas de gel et de neige.

VII. — Applications de l'électricité dans une ferme.

L'électrification rurale est particulièrement appréciée pour l'éclairage à cause de sa commodité et de ses autres avantages. Ce fait est universellement reconnu de nos jours. Il n'en est pas de même de l'utilisation des moteurs électriques, destinés à faire fonctionner les différentes machines d'une ferme. Il faut entreprendre une campagne d'instruction et de propagande considérable pour faire comprendre aux agriculteurs, que l'utilisation de l'électricité leur donne la possibilité de transformer l'exploitation de leur entreprise, de manière à économiser le travail à un degré inconnu jusqu'ici.

L'installation d'électromoteurs dans une ferme.

La grandeur d'une ferme et les conditions locales détermine la manière dont les électromoteurs doivent être installés pour pouvoir travailler rationnellement.

On peut :

soit munir chaque machine d'un électromoteur fixe (fig. 8) ;

soit munir un groupe de machines d'électromoteurs fixes ;

soit encore employer des électromoteurs transportables, pouvant actionner plusieurs machines à tour de rôle.

Il est indispensable de choisir des électromoteurs qui ne soient ni trop grands, ni trop petits pour les machines auxquelles ils sont adaptés.

1° *Le petit électromoteur.*

Les machines utilisées dans les étables sont les pompes, les hache-pailles, les pompes à vide pour machines à traire, les coupeuses de tourbe, les écrémeuses, les barattes, les malaxeurs, les meules, etc. En

Digitized by Google

général un électromoteur d'un ou deux chevaux suffit à les actionner.

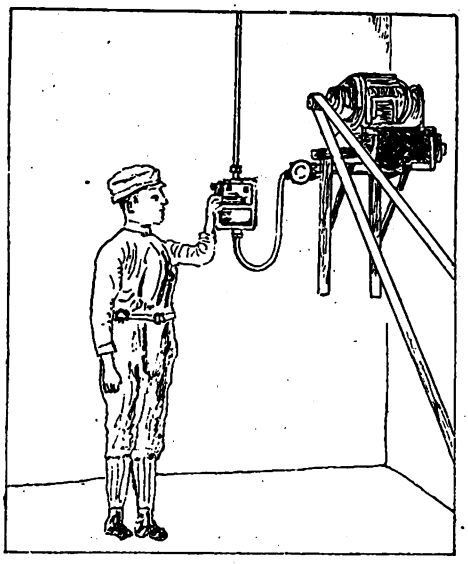


Fig. 8 — Electromoteur individuel.

Un électromoteur mobile est le moins coûteux (fig. 9). En ce qui concerne les machines employées tous les jours, telles que les pompes à

Fig. 9. — Electromoteur mobile.

eau, les pompes à vide pour machines à traire, les écrémeuses, il est

Digitized by Google

préférable d'utiliser un électromoteur fixe et d'actionner les machines par une transmission appropriée.

Machine à traire.

Les inconvénients de la traite à la main sont nombreux.

On peut signaler notamment la difficulté pour les agriculteurs de se procurer des trayeurs habiles.

Il faut en effet noter, que si les vaches ne sont pas bien traitées et si la traite n'est pas exécutée d'une manière égale et complète, il en résulte une quantité moindre de lait et une quantité moindre également de matières grasses, que le maximum qu'il est possible d'obtenir des mêmes vaches avec la même quantité de fourrage. Une traite imparfaite peut aussi occasionner des maladies coûteuses des mamelles.

Au point de vue de l'hygiène, les récipients ouverts exposent évidemment le lait à être gâté par des matières étrangères, telles que la poussière, les ordures, les cheveux, etc. ; même les récipients couverts partiellement ne présentent pas de garanties absolues sous ce rapport. Le lait peut naturellement être filtré, mais même le filtre le plus fin laisse passer une partie des matières salissantes ; les matières solubles, les ordures et les bactéries passent sans difficulté. Une simple mouche peut infecter le lait de millions de bactéries, qui se multiplient à un degré effrayant de manière à se chiffrer en quelques heures à des milliards et des billions.

Tous ces inconvénients sont évités par l'utilisation d'une bonne machine à traire. Toutefois la majorité des agriculteurs français, qui se basent sur des expériences antérieures, sont peut-être d'avis que les machines à traire ne sont pas bonnes ou ne peuvent tout au plus remplacer la main-d'œuvre que quand celle-ci fait défaut. On pourrait leur répondre que surtout pendant ces dernières années la technique de la traite mécanique a fait de tels progrès qu'il n'est plus permis de la considérer comme un pis-aller.

La Suède ne fut pas parmi les premiers pays à essayer la traite mécanique et c'est pourquoi la réaction inévitable, qui s'est produite dans d'autres pays à l'égard des premiers appareils primitifs ne s'y est pas déclarée. Depuis lors, les machines à traire ont été sensiblement améliorées et la traite mécanique s'est développée si rapidement en Suède qu'à l'exception de la Nouvelle Zélande, c'est le pays où elle est le plus répandue.

Actuellement environ 13,5 pour cent de toutes les vaches de la

Digitized by Google

Suède, sont traites à la machine. Il est intéressant de noter que même les petites fermes adoptent de plus en plus la traite mécanique. En effet, selon les derniers chiffres connus, 20 pour cent de toutes les installations de ce genre faites en 1926, l'étaient dans des fermes de moins de 10 vaches.

La fig. 10 montre une machine du dernier modèle. Elle est fabriquée

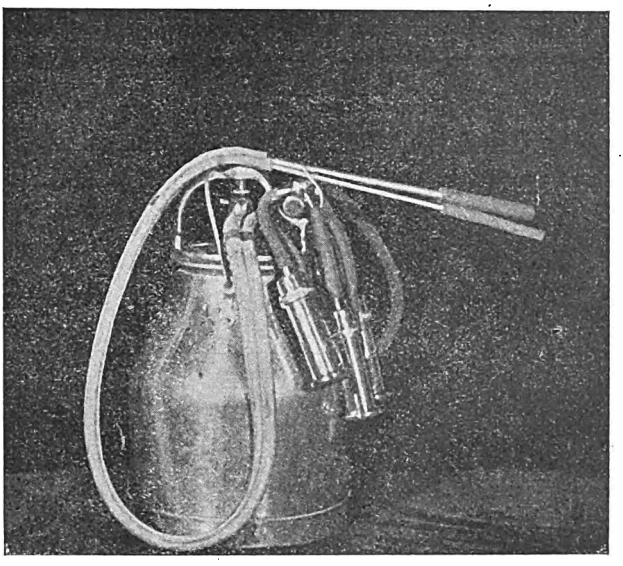


Fig. 10. — Machine à traire.

par la Compagnie Alfa-Laval, qui a mis sur le marché la première écrémeuse à débit continu. En ce qui concerne la machine à traire, cette entreprise a pu profiter des expériences faites en Nouvelle Zélande.

Les figures 11 et 12 montrent la machine en action. Elle est attachée par des tuyaux en caoutchouc à la conduite en fonte au-dessus des vaches, les gobelets-trayeurs étant fixés aux mamelles. La traite commence dès qu'on tourne le robinet de la conduite en fonte. Tout semble indiquer que la traite mécanique est agréable aux vaches.

Lorsqu'il est devenu nécessaire de vider le récipient, le surveillant n'a pas besoin d'enlever toute la machine. On n'a qu'à porter le couvercle du récipient plein à un récipient vide et continuer immédiatement la traite sur la vache voisine, le récipient plein étant porté sur la balance et ensuite vidé.

Digitized by Google

Pour obtenir le maximum de rendement possible, tant en ce qui concerne la quantité de lait qu'en ce qui concerne la richesse en matières grasses, il est nécessaire de traire les vaches complètement. Avec une bonne machine à traire on peut facilement y arriver. Mais il faut se rappeler d'autre part que les dernières gouttes de lait s'accumulent très lentement dans la mamelle. On peut économiser beaucoup de

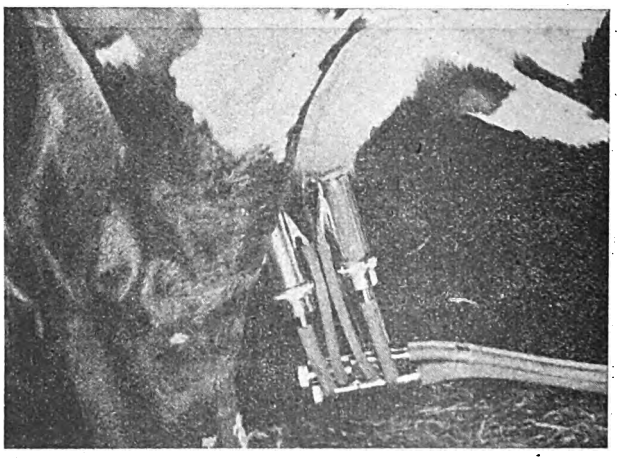


Fig 11. — Machine à traire en action.

temps en enlevant la machine d'une vache et en l'appliquant à une autre, pendant que les dernières gouttes s'accumulent dans la mamelle de la première ; le surveillant peut ensuite revenir à celle-ci et en très peu de temps faire la dernière traite de ses mains. Le surveillant peut en profiter pour contrôler que la traite s'est faite complètement et pour examiner chaque fois, si les mamelles ne sont pas atteintes de maladies.

Description technique du fonctionnement d'une installation de machines à traire.

L'électromoteur d'un ou trois chevaux actionne une pompe à vide construite spécialement. Une conduite en fonte au-dessus des vaches transmet un vide constant produit par la pompe à vide. Une conduite en fonte parallèle, transmet aux gobelets-trayeurs des « pulsations » rythmiques, produites par un dispositif de glissière à la pompe à vide, créant un vide intermittent. Ses gobelets-trayeurs sont à double enveloppes et munis à l'intérieur d'un revêtement doux, souple et élastique. A l'intérieur du revêtement, il y a un vide constant agissant sur le

Digitized by Google

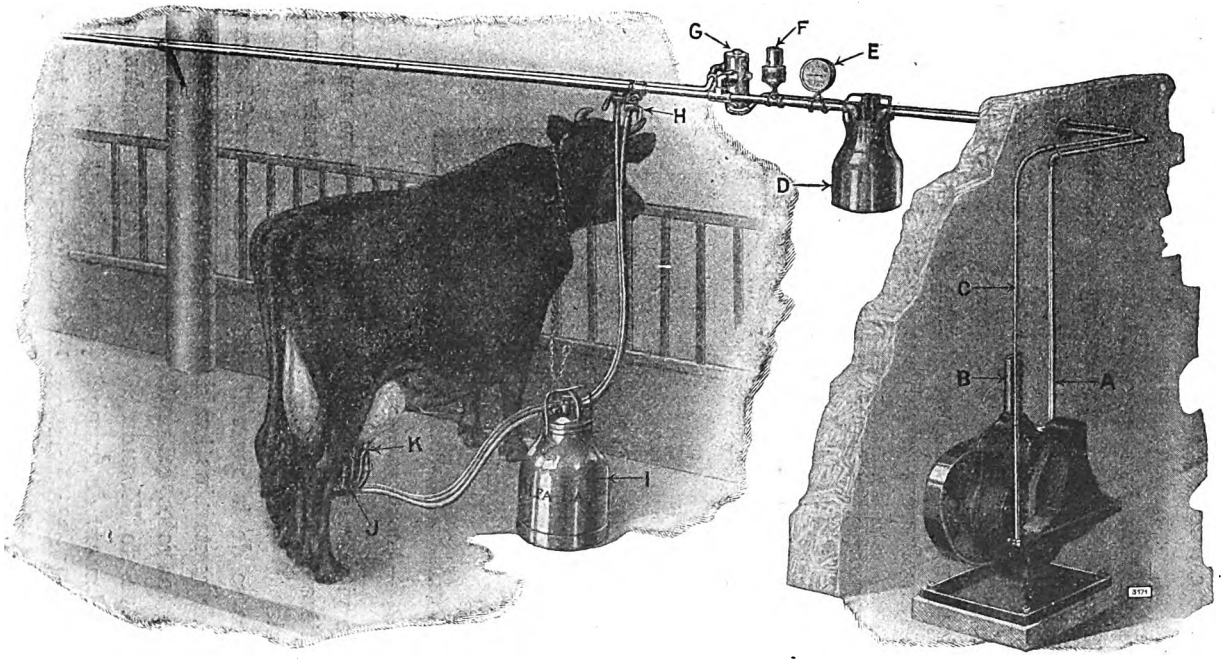


Fig. 12. — Intérieur d'une étable avec machine à traire.

A. Conduite en fonte pour le vide constant.
B. Sortie de l'air.
C. Conduite en fonte pour le vide intermittent.
D. Récipient sanitaire pour condensation de l'humidité et de la rinçure.
E. Indicateur du vide.
F. Appareil contrôleur du vide.
G. Relais pour maintenir l'intensité des pulsations dans les conduites longues.
H. Robinet.
I. Récipient de lait.
J. Distribution de pulsations contrôlant que les gobelets-trayeurs travaillent alternativement.
K. Gobelets-trayeurs.

Digitized by Google

bout de la mamelle (fig. 13). A l'extérieur du revêtement, entre le revêtement en caoutchouc et l'enveloppe en métal, il y a un vide intermittent. Lorsque la pression atmosphérique entre en action, le revêtement en caoutchouc est donc pressé autour du bout de la mamelle, ce qui fait cesser la succion. Ainsi on obtient un genre de massage, qui maintient la circulation du sang et produit la stimulation nécessaire pour la sécrétion des glandes mammaires en imitant l'action des mouvements de la langue du veau. Ce fonctionnement se distingue nettement de la traite à la main qui, même très perfectionnée, est une méthode peu naturelle. La glissière à la pompe à vide produit simultanément les pulsations nécessaires pour toutes les machines. Comme les pulsations sont absolument régulières, toutes les machines tra-

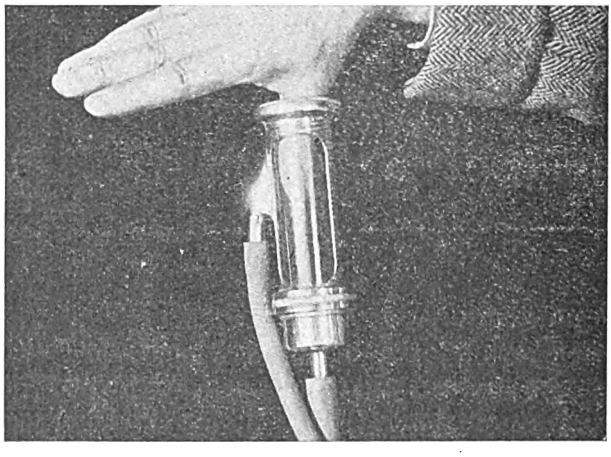


Fig. 13. — Fonctionnement du gobelet trayeur.

vaillent à la même vitesse, ce qui rend la traite toujours uniforme, condition de première importance, lorsqu'il s'agit d'obtenir le maximum de rendement.

Comme le lait passe de la mamelle au récipient hermétiquement protégé, le danger de contamination de l'extérieur, soit par des poils, du fumier ou des mains sales, est pratiquement exclu.

Quant à la question de l'économie, les conditions locales, etc., varient si considérablement de ferme à ferme, qu'il est impossible de présenter un calcul applicable dans tous les cas. En supposant toutefois que chaque machine à traire accomplit le travail d'une personne et que chaque surveillant peut manier cinq machines, il n'a pas besoin d'être démontré qu'une machine à traire est très économique à condition qu'elle soit de construction assez bonne pour permettre un amortissement raisonnable et un entretien à bon marché.

Digitized by Google

La laiterie de la ferme.

Même en quittant la mamelle, le lait n'est jamais tout à fait stérile et c'est pourquoi il est important d'arrêter la poussée des bactéries en réfrigérant le lait à une température suffisamment basse. A l'aide d'un

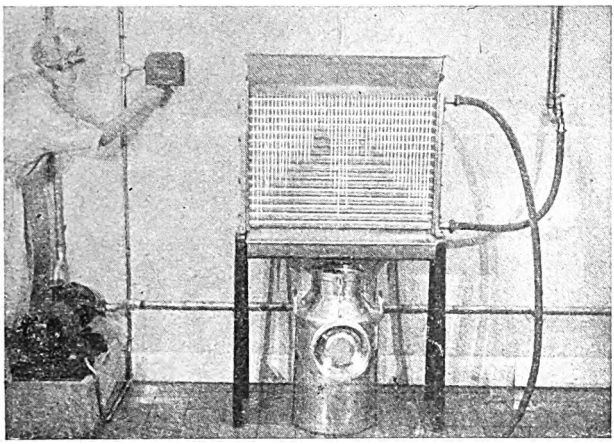


Fig. 14. — Rafraîchissoir du lait.

rafraîchissoir à tuyaux par lequel on fait passer 1 200 litres d'eau à 10 centigrades (fig. 14), on peut refroidir environ 500 litres de lait de

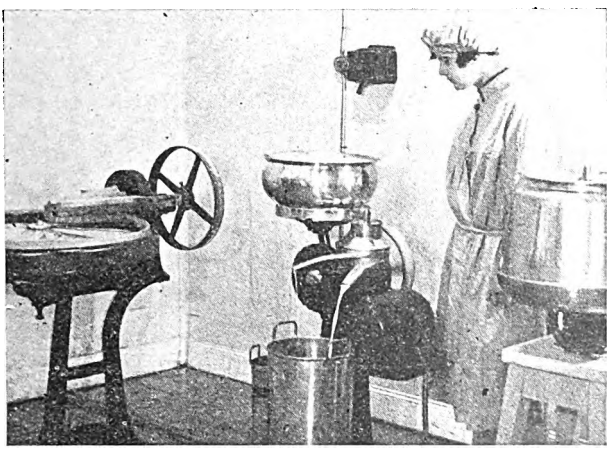


Fig. 15. — Ecrémeuse.

34° à environ 13° centigrades, c'est-à-dire 3° centigrades au-dessus de la température de l'eau. A titre de comparaison, il sera permis de mentionner qu'il faut trois fois autant d'eau pour refroidir la même quan-

Digitized by Google

tité de lait dans un bassin à eau stagnante. Les bactéries se multiplient environ 1 800 fois pendant 5 heures à une température de 34° centigrades, tandis que le chiffre correspondant est de moins de 30 à une températures de 13° centigrades.

Pour rendre possible le refroidissement du lait et le nettoyage des

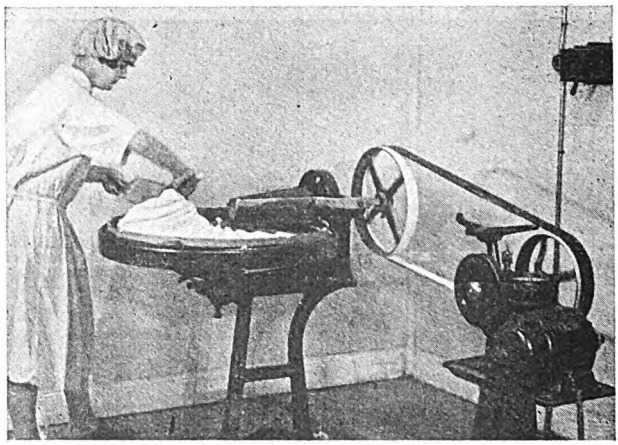


Fig. 16. — Baratte.

machines à traire et des récipients, une quantité d'eau considérable est nécessaire. Dans ce cas aussi l'électromoteur peut rendre des services comme source d'énergie pour le pompage.

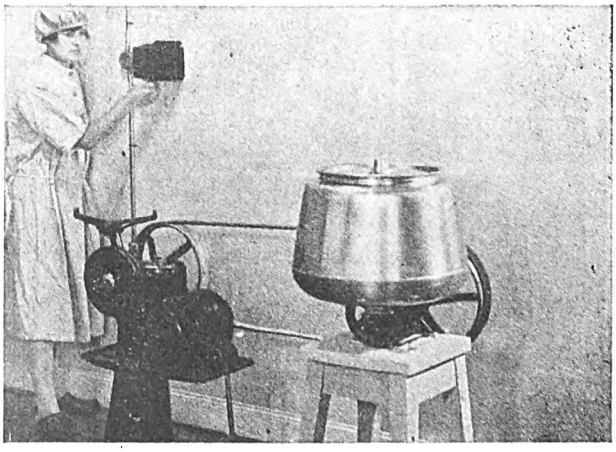


Fig. 17. — Malaxeur.

La fig. 15 montre une petite laiterie de ferme pour la préparation du beurre, comprenant une écrémeuse, une baratte (voir fig. 16) et un malaxeur (voir fig. 17). L'écrémeuse est commandée par un élec-

Digitized by Google

tromoteur d'environ 1/2 cheval et par un engrenage, permettant aussi le cas échéant d'actionner par une courroie la baratte ou le malaxeur.

Le nettoyage à l'eau des appareils de la laiterie.

Pour le nettoyage des récipients et des appareils de la laiterie et particulièrement des machines à traire, un réchaud d'eau électrique est réglé pour la température voulue (en général 80° à 90°C) et est mis automatiquement hors circuit, dès que le contenu a atteint la température désirée.

En ce qui concerne les machines à traire, il est désirable qu'elles soient tenues aussi scrupuleusement propres que possible. La plupart des machines à vide exécutent la traite hermétiquement et en conséquence les risques d'infection du lait sont moindres que lorsqu'on trait à la main. Mais il est indispensable également de ne laisser aucun reste de lait dans les machines. Les résidus de vieux lait constituent, en effet, une culture de bactéries qui ont une telle faculté de multiplication qu'un reste infime suffit à gâter des quantités considérables de lait frais. Quand il s'agit de combattre des germes de bactéries, des petites causes peuvent avoir de graves conséquences. Ainsi, dans une ferme modèle, où toute la traite se faisait encore à la main, les plus grands efforts étaient déployés pour réduire autant que possible le nombre de bactéries dans le lait sans qu'un résultat appréciable fut atteint. Un jour on en découvrit la cause : les escabeaux des trayeurs n'avaient jamais été lavés.

Au début, quand les machines à traire furent lancées sur le marché, on pensait qu'il serait possible d'obtenir d'emblée un lait de première qualité, puisqu'il n'était pas exposé au contact de l'air de l'étable. Malheureusement il était souvent difficile ou impossible de tenir les machines propres, le caoutchouc devenait un véritable foyer de bactéries et il y avait beaucoup d'angles et de coins inaccessibles lors du nettoyage des machines.

Pour cette raison, les machines à traire jouirent longtemps d'une mauvaise réputation. Maintenant qu'il est possible de les tenir parfaitement propres, ce préjugé devra céder devant l'expérience.

Il est toutefois d'une grande importance que le nettoyage ne soit pas entravé par le manque d'eau chaude. Ce travail s'accomplit sans difficulté. Il est considérablement facilité par le courant d'eau qui, aspiré par le vide, parcourt la machine, les tuyaux en caoutchouc,

Digitized by Google

etc. (fig. 18). La conduite en fonte, qui pourrait aussi devenir un foyer

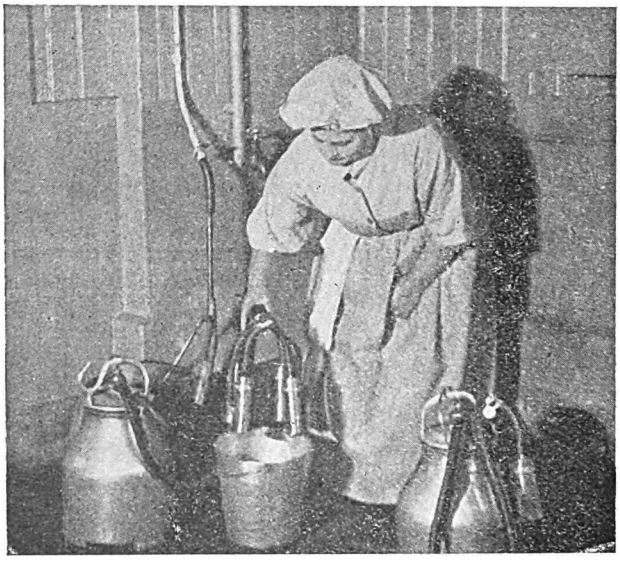


Fig. 18. — Nettoyage de la machine à traire.

de contamination, doit être fréquemment nettoyée de la même manière (fig. 19).

2° *L'électromoteur de grandeur moyenne.*

Pour actionner les machines du magasin à blé, un électromoteur

Fig. 19. — Nettoyage de la conduite.

de 3 à 5 ch est en général suffisant. Ces machines n'étant utilisées

Digitized by Google

qu'occasionnellement, on emploie souvent un électromoteur transportable (fig. 20).

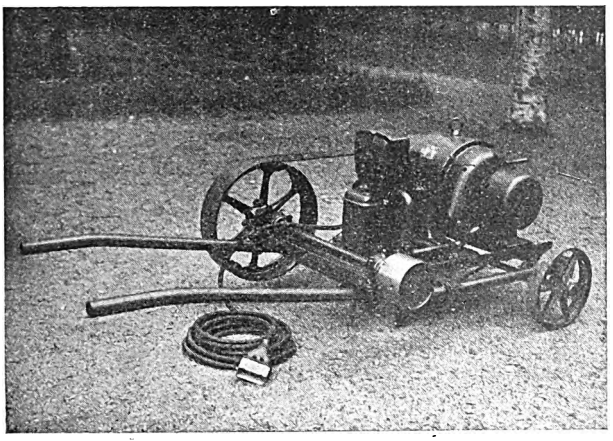


Fig. 20. — Electromoteur mobile du magasin à blé.

Ici aussi il est préférable d'employer un électromoteur fixe pouvant actionner plusieurs machines. La fig. 21 montre une installation de

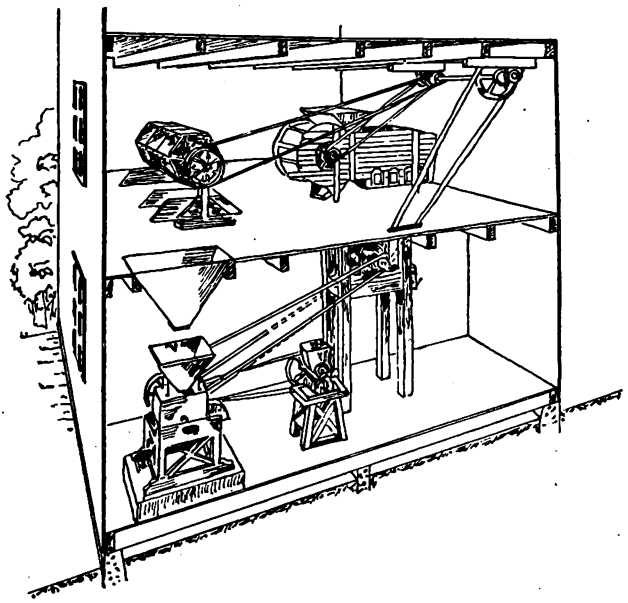


Fig. 21. — Electromoteur fixe du magasin à blé.

ce genre dans certaines contrées où on utilise des batteuses ne nécessitant qu'u 5, 7 ch.

Digitized by Google

3° *Le grand moteur.*

Le grand moteur est employé à actionner la batteuse et ses machines auxiliaires.

On peut l'installer de trois manières :

a) *L'électromoteur de la batteuse accouplé au même transformateur que les autres moteurs.*

Dans ce cas, on emploie en général une tension de 380 V. Dans les grandes fermes, l'électromoteur est souvent installé dans la grange avec la batteuse et ses machines auxiliaires.

Cela présente l'avantage d'un usage commode à une basse tension. Il existe cependant un inconvénient. Il faut adopter un transformateur d'une puissance assez grande. La puissance de l'électromoteur de batteuse est toutefois si considérable par rapport aux autres modes de consommation, que le transformateur doit travailler avec une perte considérable d'énergie résultant de la marche à vide ou à faible charge et que les fils conducteurs à l'électromoteur de la batteuse doivent être très lourds.

Les électromoteurs mobiles appartiennent souvent à des sociétés coopératives.

L'électromoteur mobile.

L'électromoteur est posé sur roues ; muni de roulement à billes, il est protégé contre l'eau. L'appareil, avec son dispositif de mise en marche composé d'un commutateur pour la mise en circuit, des appareils de protection, etc., est complètement couvert.

Un câble muni d'une prise de courant est destiné à relier l'électromoteur mobile au tableau de distribution de la ferme.

b) *L'électromoteur de la batteuse accouplé à un transformateur séparé.*

Si, pour le battage, on prend l'énergie électrique directement au réseau 3 000 ou 1 500 V, on a besoin d'un commutateur de haute tension fixé sur un poteau en bois et d'un transformateur séparé alimentant l'électromoteur de la batteuse.

Poste de commutateur à haute tension.

Le commutateur est composé de deux parties, l'une placée au bout du poteau, directement connectée aux fils conducteurs à haute tension, l'autre mobile et connectée à un câble spécialement construit qui

Digitized by Google

doit être relié, soit à la bobine de haute tension du transformateur, soit à l'électromoteur de la batteuse dans le cas où ce moteur travaille à une tension de 3 000 ou 1 500 V. La partie supérieure du commutateur se

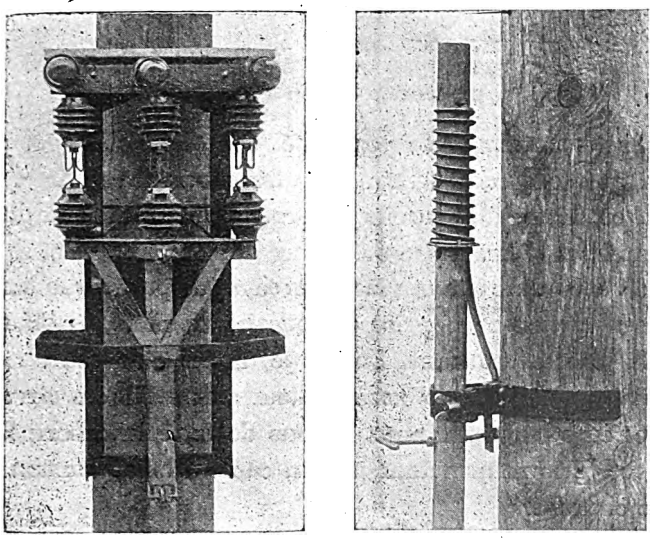


Fig. 22. — Commutateur à haute tension fermé.

compose d'un cadre forgé, sur lequel sont attachés trois isolateurs en porcelaine munis de contacts à ressorts. La partie inférieure se compose aussi d'un cadre forgé, muni de trois prises de courant en forme

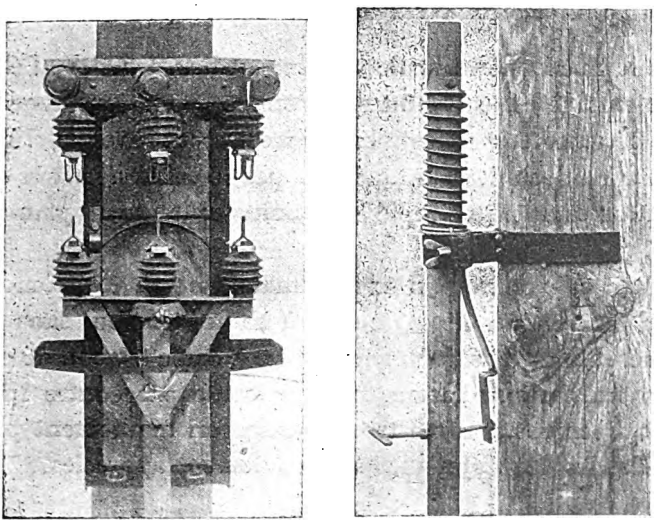


Fig. 23 Commutateur à haute tension ouvert.

de lames avec lesquelles est connecté le câble à haute tension. Cette partie est placée sur une perche en bois à l'aide de laquelle elle est commandée du sol. La perche peut être maintenue en ses deux positions extrêmes, par un dispositif à ressorts.

Digitized by Google

La fig. 22, montre le commutateur mis en circuit.

La fig. 23, le montre hors circuit.

Près du poteau du commutateur à haute tension, le transformateur mobile est placé de manière à réduire autant que possible la longueur du câble à haute tension.

c) *Le transformateur mobile.*

Le transformateur, d'une capacité de 15-40 kVA, est posé sur une voiture, protégée contre l'eau. Le transformateur de type intérieur normal, est muni d'appareils de protection, d'un compteur de kilowatt-heures et d'une boîte de prise de courant. Cette dernière est munie d'un commutateur à lames avec un dispositif rendant impossible la mise en circuit de la prise de courant du câble, avant que soit connectée la prise de courant. De même, la prise de courant ne peut pas être enlevée avant que le commutateur soit mis hors circuit.

L'électromoteur dont nous venons de faire la description, est connecté avec le transformateur par un câble à basse tension muni d'une prise de courant.

Dans le cas où le battage a lieu en plein air, aux champs, une ligne à haute tension est conduite aux champs où l'installation est la même qu'à l'intérieur de la ferme.

c) *L'électromoteur à haute tension pour le battage.*

Dans la Suède Méridionale, où on utilise 1 500 V, l'électromoteur pour le battage est construit spécialement pour cette tension. Dans ce cas, l'électromoteur est connecté directement avec la ligne de haute tension au moyen du commutateur par le câble décrit ci-dessus. Cette installation est la plus simple et la moins coûteuse au point de vue technique.

Le battage, soit avec un transformateur et un électromoteur à basse tension, ou avec un électromoteur à haute tension sans transformateur, présente l'avantage sur le battage à basse tension de coûter moins cher en frais d'installation, mais présente par contre l'inconvénient que l'équipement à haute tension exige un maniement plus prudent. En Suède, les deux systèmes sont également appréciés.

La batteuse.

Les avantages les plus importants de l'emploi de l'électromoteur pour actionner la batteuse sont les suivants :

1° Elimination du danger d'accidents occasionnés par le feu, danger

Digitized by Google

qui existe toujours lorsqu'on utilise des engins à vapeur ou à huile combustible.

2° L'électromoteur est prêt à être employé immédiatement à n'importe quel moment de la journée. Il ne nécessite en outre qu'un minimum de surveillance et est facile à manier.

3° Comme le moteur triphasé marche à la même vitesse indépendamment de la charge électrique, le battage se fait d'une manière plus régulière qu'avec les machines à vapeur ou à huile combustible. En conséquence, le temps nécessaire pour le battage est considérablement réduit et surtout le triage des grains se fait de manière absolument uniforme, avantage impossible à réaliser par d'autres méthodes.

Le moteur de la batteuse et l'appareillage nécessaire, peuvent être montés sur une voiture qui rend possible leur transport. Il arrive très souvent que plusieurs petits fermiers se procurent un équipement de ce genre, pour usage coopératif. La superficie des terres céréales ne doit pas être inférieure à 125 hectares.

Installations électro-mécaniques pour le transport des récoltes.

L'importance du problème de transport pour la grande industrie, et le rôle considérable de l'électromoteur dans ce domaine, sont devenus de plus en plus évidents.

Une question de grande actualité est donc l'utilisation d'installations électro-mécaniques pour l'économie de travail.

On peut citer bien des exemples montrant que l'électricité, appliquée d'une manière rationnelle, peut améliorer les transports nécessaires ainsi que l'exploitation quotidienne de nos fermes.

Sous ce rapport, on a fait en Suède, au cours de ces dernières années, des inventions et des améliorations de construction, spécialement concernant les élévateurs et les ventilateurs de transport pour le foin et le blé, etc., qui ont beaucoup attiré l'attention des agriculteurs non seulement en Suède, mais aussi à l'étranger.

L'élévateur électrique.

Toute la charge de foin ou de blé, arrivant des champs, est rapidement enlevée en une fois du chariot à l'aide de l'élévateur électrique. Dans ce but, la charge est manœuvrée par un treuil, commandé par un moteur électrique, et qui contrôle une voiturette roulant sur un rail, suspendu dans la toiture de la grange ou du grenier à foin. Elle est déchargée à l'endroit désiré. Si l'étable est réunie à la grange sous un même toit, le même élévateur peut être employé pour les deux.

Digitized by Google

La fig. 24 montre un type de « preneur de charges », composé de

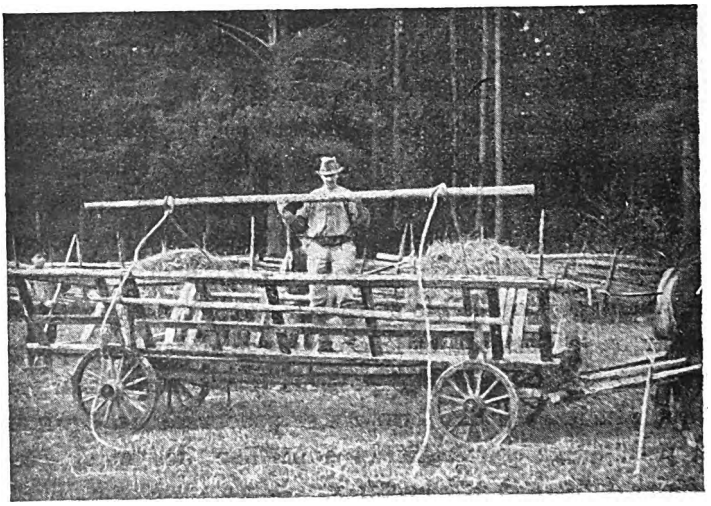


Fig. 24. — Preneur de charges.

deux cordes, reliées par une perche placée au fond du chariot lors du chargement.

Fig. 25 — Manœuvre du preneur de charges.

Aux champs, des crochets appliqués aux bouts des cordes réunis-

Digitized by Google

sent celles-ci au-dessus de la charge, qui de cette manière est bien maintenue.

La fig. 25, montre le cocher attachant les crochets du preneur de charges à la flèche, qui par des poulies et des cordes d'acier est reliée à la voiturette dans la toiture de la grange.

La fig. 26, montre le treuil-élévateur d'une construction moderne, commandé par un moteur électrique de 5 chevaux.

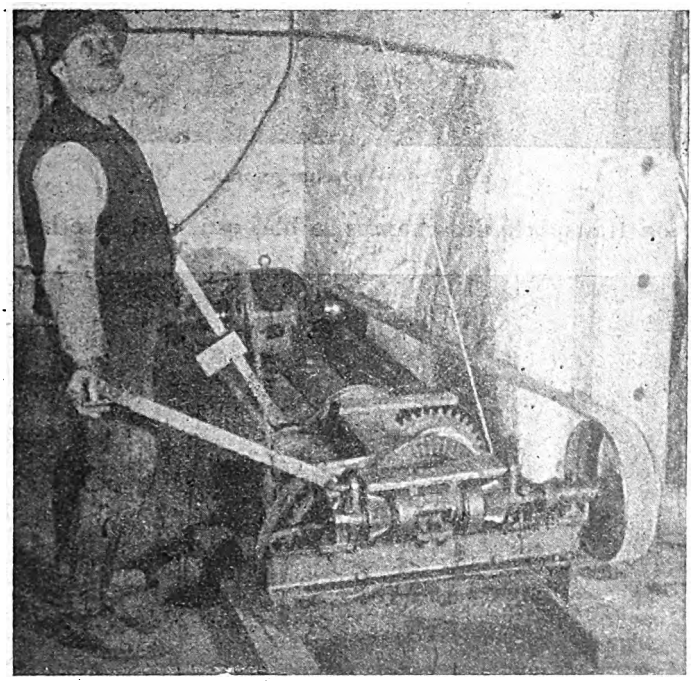


Fig. 26. — Treuil élévateur électrique.

En manœuvrant les deux leviers du treuil, on enlève toute la charge du chariot. Par des manœuvres différentes, avec les leviers et une corde d'acier sans fin, on peut faire monter ou descendre la charge à volonté ou bien mettre en marche la voiturette en avant ou en arrière sur le rail dans la toiture de la grange (fig. 26 et 27).

En faisant lentement osciller la charge contenue par le preneur de charges et en tirant ensuite au moment voulu la corde pendant de la

Digitized by Google

flèche (fig. 27), on peut faire lâcher la charge, qui tombe dans l'emplacement voulu de la grange.

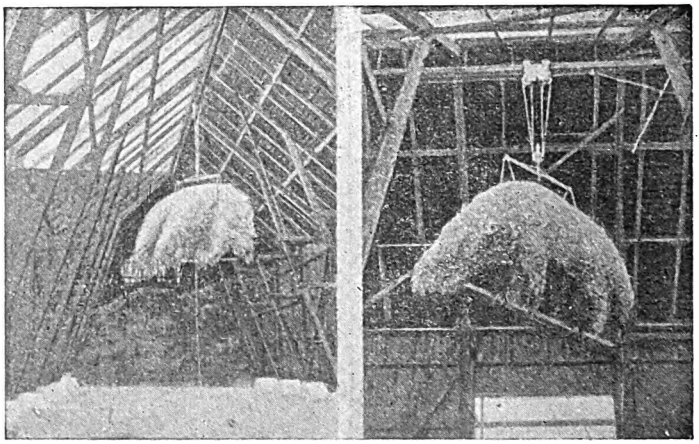


Fig. 27. — Déchargement.

Quand on transporte des champs le blé, qui doit être battu immé-

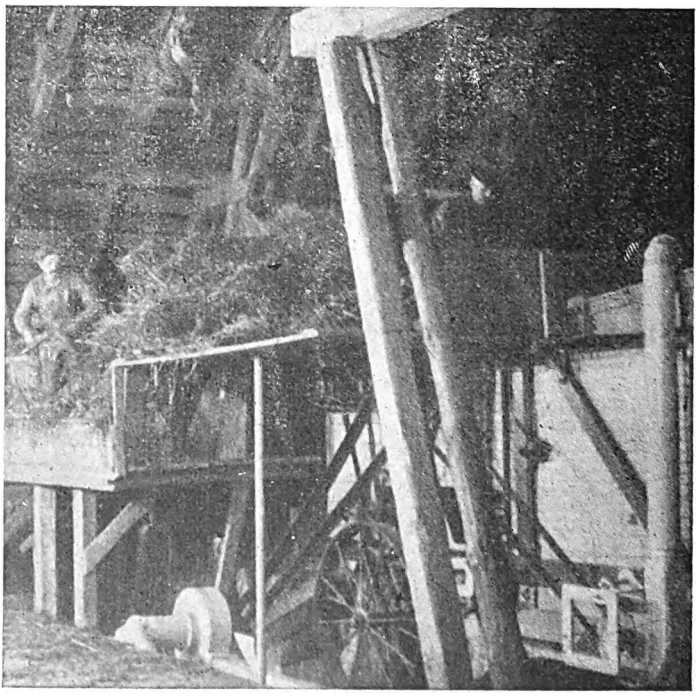


Fig 28 — Déchargement sur la batteuse.

diatement, la charge peut être déchargée directement sur la table de la batteuse (fig. 28).

Digitized by Google

Si le blé non-battu est emmagasiné dans la grange pour l'hiver, il doit plus tard être retransporté de la grange à la batteuse. En attachant une griffe à la flèche mentionnée, on peut facilement soulever une charge de blé d'environ le même contenu qu'un petit chariot agricole et la transporter de la grange à la batteuse.

Fig. 29. — Transport à l'aide d'une griffe.

La fig. 29, montre la charge — transportée par le treuil-élévateur à la table de la batteuse — qui vient de tomber à la suite d'un coup donné avec la fourche au dispositif de fermeture de la griffe.

L'expérience a démontré que la récolte d'une ferme, pourvue d'un appareil élévateur électrique, peut être engrangée en un laps de temps considérablement plus court que par travail manuel avec le même nombre d'ouvriers. Dans le premier cas, le déchargement à la grange se fait beaucoup plus vite avec deux ou trois hommes que dans le dernier avec cinq ou six. La main-d'œuvre, ainsi libérée, peut être employée aux champs ce qui permet de faire le chargement d'autant plus rapidement.

Le gain de temps dépend naturellement en grande partie des conditions locales, telle que la distance entre les champs et la grange, etc. En général, on a constaté qu'il est de moitié.

Digitized by Google

Les dépendances de nos fermes, telles qu'elles ont été construites depuis des siècles, sont en général disposées d'après le même principe : une étable, munie d'un toit incliné, où l'espace sous le toit, nommé grenier à foin, est utilisé comme dépôt pour des quantités limitées de foin et de paille. Le fourrage pouvait donc facilement être descendu du grenier par des ouvertures dans le plancher, et ainsi être donné directement aux animaux qui se trouvaient au-dessous.

Autrefois on construisait l'étable avec un grenier d'une hauteur insignifiante. Comme le grenier ne pouvait contenir qu'une quantité limitée de fourrage, on construisait en général à proximité une grange également de hauteur minime, pouvant contenir le reste de la récolte annuelle.

L'utilisation, de cette manière, de l'espace dans le plan horizontal, rendait plus facile le chargement et le déchargement.

Une étable, un grenier et une grange comprenant ensemble un espace d'environ 4 000 m³, peuvent contenir le fourrage nécessaire à la nourriture des animaux pendant une année, ainsi qu'une partie de la récolte de blé.

L'aménagement d'un pont, donnant accès directement au grenier, a rendu possible l'emploi de constructions plus élevées. La hauteur aussi bien du grenier au-dessus de l'étable que de la grange fut donc augmentée, et l'extension de la grange dans le plan horizontal put être réduite sensiblement, quoique l'espace utilisable pour la récolte restât intact.

Ce système a toutefois un inconvénient, indépendamment des frais d'entretien considérables : la prolongation du pont à travers le grenier et la grange empiète en effet sur l'espace utile, la dite prolongation ne pouvant en général pas servir de dépôt.

Vint ensuite l'élévateur électrique. Celui-ci rend possible une plus forte réduction de l'espace dans le plan horizontal et une augmentation correspondante dans le sens vertical. Il en résulte des bâtiments plus élevés où tout l'espace peut être utilisé pour la récolte. Il s'en suit que le grenier au-dessus de l'étable et de l'écurie, se développe de manière à devenir une grange proprement dite, pouvant contenir toute la récolte annuelle nécessaire au nourrissage des animaux. Ainsi on économise tous les transports entre la grange et le grenier, ce qui représente un travail considérable.

L'économie des frais d'installation n'est sans doute pas très importante, mais d'une part, on n'a qu'une bâtisse et qu'un toit qui en représente la partie la plus délicate à entretenir et d'autre part — et sur-

Digitized by Google

tout — on évite entièrement les frais de transport entre la grange et le grenier.

Comme il appert de ce qui précède, l'installation d'un élévateur électrique rend possible un système de construction entièrement nouveau en ce qui concerne l'étable et la grange d'une ferme, supposé qu'on installe un système de transport rationnel.

Le ventilateur électrique de transport.

Le ventilateur électrique a trouvé, ces derniers temps, une applica-

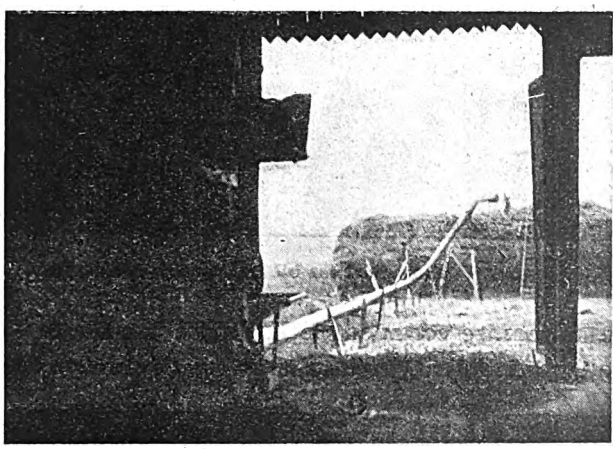


Fig. 30 — Transport de la paille par ventilateur.

tion très remarquable. On sait qu'il est employé depuis assez longtemps, pour chasser la vannure de la batteuse à travers des tuyaux de plusieurs centaines de mètres dans le dépôt y affecté. Par un tuyau vertical, la vannure est chassée directement de la batteuse dans le grenier au-dessus de l'étable.

On a trouvé cependant que l'on peut, de la même manière, chasser aussi la paille non-coupée à cent ou deux cents mètres de la batteuse au dépôt, que celui-ci soit un grenier ou un tas de paille en plein air. Il y a actuellement un millier d'installations de ce genre dans notre pays. La paille, tombée directement de la batteuse dans un entonnoir attaché au ventilateur, est chassée par une conduite de tuyaux, posée temporairement pour la diriger sur un tas en plein air (fig. 30).

Ces dernières années, on a adopté à la ferme d'Ahlby près de Stockholm une installation semblable pour le blé battu. Ce blé, lors du battage, est transporté directement de la batteuse à l'aide d'un ventila-

Digitized by Google

teur et d'un injecteur relié par un tuyau de 60 mètres au quatrième étage du grenier à blé (fig. 31).

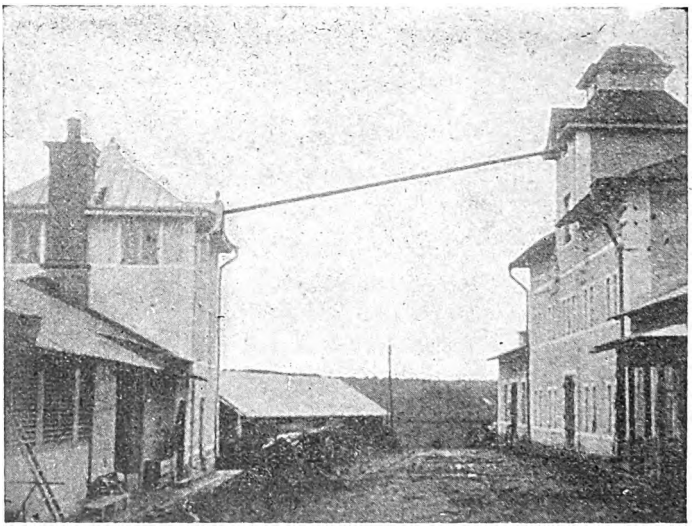


Fig. 31. — Transport du blé battu par ventilateur.

La figure 32 montre comment le blé battu, tombe de l'orifice de la conduite de tuyaux dans l'étage supérieur du grenier à blé.

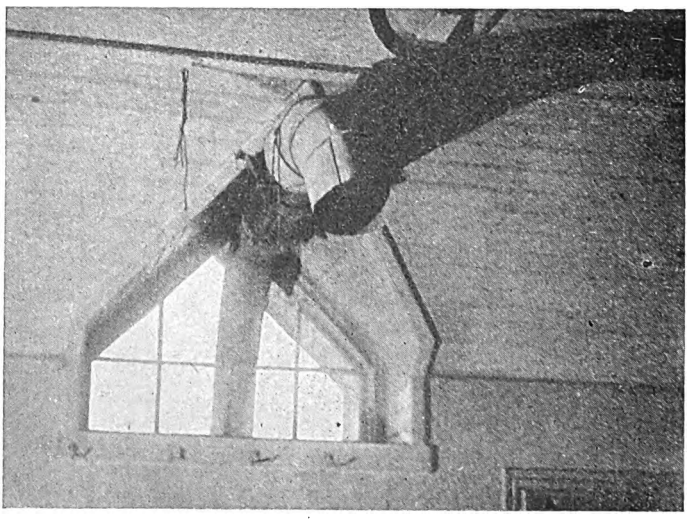


Fig. 32. — Arrivée du blé battu dans le grenier à blé.

On avait exprimé la crainte que la faculté germinative des grains ne souffrit de la friction contre les tuyaux, mais des essais de germination ont prouvé que ces craintes ne sont pas fondées.

Digitized by Google

On comprendra facilement quelle économie de frais de transport représente cette installation, relativement très économique. En réalité, on n'a pas besoin d'un personnel plus grand pour le déchargement et le battage du blé, ainsi que pour le transport du blé, de la paille et de la vannure dans les différents dépôts que pour le seul engrangement du blé non-battu. Les années où le blé est bien mûr et sec, ce qui en général est le cas, le travail auquel donne lieu la récolte, est donc terminé au moment où la dernière charge a été transportée des champs à la batteuse.

Ces installations peuvent, même dans des anciens bâtiments, rendre de grands services sans entraîner de modifications considérables. La ferme d'Ahlby en est un exemple. La conduite des tuyaux pour chasser le blé de la grange au grenier y a été installée pour 1 000 fr.

Toutefois avec l'adoption du ventilateur électrique, un problème entièrement nouveau s'est posé. Il s'agit en effet de construire un grenier à blé, doté d'installations de transport électro-mécaniques, et relié également de manière rationnelle à la grange et aux autres dépendances de la ferme.

En un mot, l'électricité a rendu possible et nécessaire un système de construction nouveau et plus rationnel, en ce qui concerne toutes les dépendances de la ferme.

En général, il n'est sans doute pas possible de changer radicalement les dispositions des dépendances d'une ferme, pour permettre l'exploitation idéale des installations électriques, mais on peut procéder à des transformations quand il est question de réparations d'une certaine envergure.

Quand il s'agit de construire entièrement à neuf, il serait impardonnable de le faire selon l'ancienne méthode, quand on peut réduire, par des dépendances établies rationnellement et dotées d'installations électro-mécaniques, les frais d'entretien annuels sans augmenter les frais de construction.

L'ÉLECTRICITÉ DANS L'HORTICULTURE.

C'est un fait connu depuis longtemps que l'électricité exerce une influence favorable sur la végétation. On a fait des expériences intéressantes à cet égard. Des expériences ont été de trois sortes :

1° Chauffage électrique de serres;
2° Eclairage électrique des plantes ;
3° Chauffage électrique des bâches vitrées.

Digitized by Google

Parmi ces différentes applications de l'électricité, on n'a obtenu un résultat économique intéressant que dans le troisième cas. La raison de l'adoption de l'électricité dans ce but a été la pénurie croissante de fumier d'écurie aux environs des grandes villes. La meilleure méthode est de faire passer un courant dans un câble spécial, contenant un fil de résistance isolé à l'asbeste et recouvert de plomb. Le câble est divisé en sections dont la longueur dépend de la tension du courant employé.

La fig. 33 montre la disposition du câble placé dans une bâche.

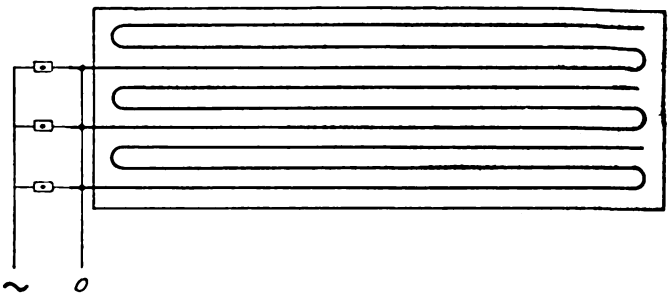


Fig. 33. — Disposition d'un câble pour le chauffage de terre en couches.

On commence par poser une couche de cendres. On met dessus plusieurs rangées de tuyaux en briques, par lesquels on fait passer les câbles reliés à des tableaux de distribution.

On remplit ensuite les bâches de terre à la hauteur désirée.

La pose des plantes se fait pendant que la terre est encore couverte de neige. Après que la bâche a été chauffée pendant environ un mois, des salades sont prêtes à être récoltées.

On peut utiliser l'énergie électrique exclusivement pendant la nuit pour ce chauffage, la terre ayant la propriété de conserver la chaleur pendant le jour.

Cet emploi de l'électricité a donné ce printemps des résultats très intéressants. Des essais ont été faits sur une grande échelle par un maraîcher et par la Station d'essais de l'Etat aux environs de Stockholm.

Dans le premier cas, 60 000 pieds de salade ont été cultivés et vendus sur les marchés de Stockholm. Par la culture électrique, le temps de végétation a été réduit de 25 pour cent par rapport à la culture au fumier d'étable.

En ce qui concerne le résultat financier, on peut dire qu'avec un prix de 3 centimes — l'énergie électrique n'étant utilisée que pendant la nuit — il est très satisfaisant quand on tient compte de ce que le fumier est très cher.

Digitized by Google

Quand une bâche ordinaire a été employée pour une culture — le fumier est consumé en deux ou trois semaines — on doit la refaire complètement. La bâche électrique au contraire peut être utilisée pour plusieurs cultures, non seulement pendant la même année, mais pendant plusieurs années consécutives.

Si la première culture au début du printemps a été de la salade, on peut la faire suivre par exemple par une culture de melons mûre vers la fin de juin, et ensuite une culture de tomates prête en août, et enfin une culture de légumes, prête vers le mois d'octobre et pouvant être maintenue en vie à une température légèrement au-dessus de 0°C jusqu'aux fêtes de Noël.

Il s'agit donc d'une toute nouvelle évolution de l'horticulture.

La cuisson électrique.

Le but, qu'on se popose par la cuisson, est de tirer des aliments le plus possible de substances nutritives en tenant compte des moyens financiers du ménage, tout en variant les mets d'une manière agréable. L'emploi des fourneaux à charbon actuels constitua un immense progrès pour l'art culinaire.

L'adoption du fourneau à gaz, qui date en Suède de 1912, simplifia le travail considérablement, en permettant de supprimer le chauffage au charbon et la surveillance constante du fourneau.

Il y a quelques années, le problème de l'utilisation de l'électricité pour la cuisson a fait l'objet de discussions approfondies entre les électriciens.

Les flammes du fourneau à gaz servent à chauffer, d'une part les récipients et d'autre part le four à cuire du pain et à rôtir. Dans le fourneau électrique ordinaire, on utilise les fils de résistance échauffés par le courant électrique, et introduits dans le fourneau, d'un côté par les plaques de cuisson et de l'autre par des dispositifs pour le chauffage du four.

Les heures de consommation de ce fourneau, que l'on appelle en général fourneau à puissance, ne conviennent pas aux usines génératrices. C'est pourquoi on a eu l'idée d'en construire un, qui utilise l'énergie électrique nuit et jour d'une manière ininterrompue, et qui est appelé fourneau thermique à accumulation.

L'usine électrique de Stockholm a voué une attention particulière à la solution du problème.

Digitized by Google

C'est ainsi qu'elle a construit le fourneau « Seves ».

Ce fourneau comprend d'abord un bloc en fonte, accumulant la chaleur qui lui est fournie par deux bobines électriques.

Une des bobines est parcourue jour et nuit sans interruption par l'énergie électrique d'une puissance d'environ 300 W, qui donne au bloc continuellement une température d'environ 500°C. Cette température ne baisse pas d'une manière appréciable, les pertes en chaleur étant continuellement compensées par l'énergie électrique fournie.

L'autre bobine ayant environ la même puissance, reçoit l'énergie électrique par un commutateur-thermostat contrôlant le débit, et n'est mise en circuit qu'occasionnellement, c'est-à-dire que quand la tempé-

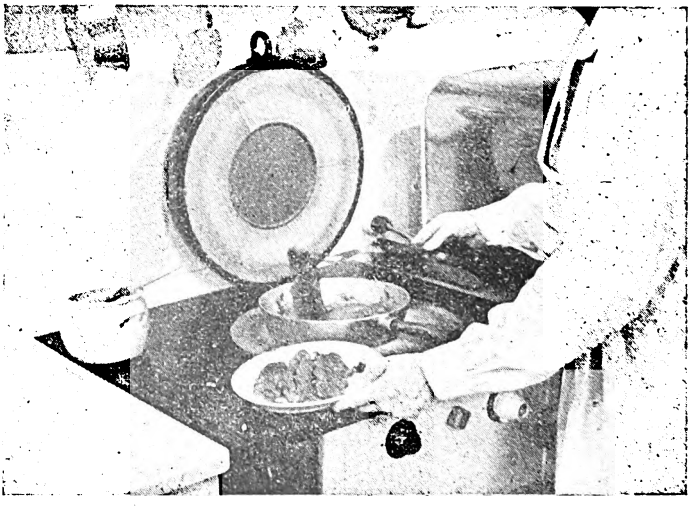


Fig. 34. — Plaque de cuisson du fourneau Seves.

rature du bloc en fonte descend au-dessous de 500°C à la suite de la cuisson. Quand cette température est atteinte de nouveau, la bobine est automatiquement mise hors circuit.

La partie supérieure du bloc en fonte est aplatie et constitue une plaque de cuisson, munie d'un couvercle à isolateur thermique (fig. 34).

La plaque de cuisson transmet autant de chaleur à un récipient qu'une plaque électrique ordinaire, avec fils de résistance parcourus par un courant d'une puissance de 2,5 kW.

On peut varier facilement la chaleur communiquée par la plaque au récipient, en réglant leur distance à l'aide d'un levier.

Le fourneau de Seves comprend encore un four dont la température

Digitized by Google

presque constante est maintenue à environ 90°C (fig. 35). La chaleur lui est fournie par la partie inférieure du bloc en fonte, susmentionné, au moyen d'un thermostat mécanique se réglant automatiquement.

On applique ainsi une méthode de cuisson entièrement nouvelle. D'abord, on fait rapidement bouillir le contenu du récipient sur la plaque très chaude du fourneau, puis on place le récipient dans le four de 90°C où se fait la cuisson de longue durée et où la préparation des aliments a lieu sans qu'on ait besoin de s'en occuper. On a pu ainsi obtenir un rendement supérieur des aliments et une économie importante de travail.

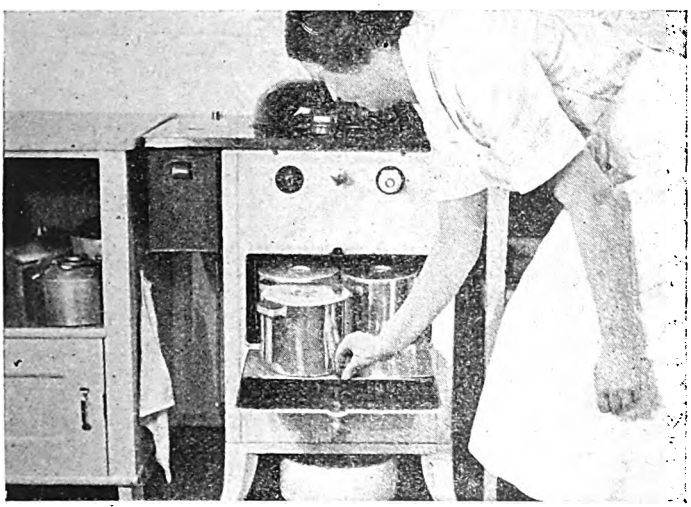


Fig. 35. — Four Seves à température constante.

Les avantages du fourneau de Seves sont évidents. Au moyen du thermostat mécanique, la chaleur accumulée dans le bloc en fonte peut être utilisée également pour le chauffage du four sans qu'il soit nécessaire de mettre à contribution une autre source de chaleur, par exemple par l'installation d'une bobine spéciale dans le four. Même si le courant électrique du fourneau est complètement interrompu pendant quelque temps, cela n'a aucune influence sur la chaleur du four tant que le bloc en fonte retient de la chaleur accumulée.

En effet, la capacité d'accumulation du fourneau est si grande qu'en général le courant électrique peut, sans inconvénient, être interrompu tous les jours pendant plusieurs heures, par exemple durant la période de pointe de l'usine électrique.

Si l'on emploie un réchaud d'eau en combinaison avec le fourneau

Digitized by Google

électrique, et si l'on met ce réchaud dans le circuit d'un commutateur interrompant le circuit automatiquement dès que la température de l'eau dépasse 90°C, le commutateur-thermostat automatique du bloc en fonte contrôle le débit d'énergie de manière à ce que le réchaud d'eau ne soit mis en circuit que pendant les périodes où la température du bloc en fonte dépasse 500°C, et que la bobine dudit bloc est sans courant électrique.

Il faut choisir la résistance du réchaud d'eau, de manière à permettre l'obtention de la puissance nécessaire pour que la quantité d'eau dont on a besoin soit réchauffée à la température voulue. La puissance de charge dépend du nombre des membres de la famille.

Il faut compter sur une consommation de 1 à 1,2 kWh par personne et par journée pour la cuisson, et de 0,12 kWh pour le chauffage de chaque litre d'eau à 90°C. Il est donc utile de choisir les deux bobines du fourneau et la bobine du réchaud d'eau, de manière à ce que l'énergie électrique nécessaire soit fournie pendant 18 à 20 heures de la journée. En général, on choisit la bobine temporairement mise en circuit du fourneau de la même grandeur que la bobine du réchaud d'eau.

Exemple :

Une famille de six personnes consomme 30 litres d'eau chaude par jour

6 personnes consomment pour la cuisson	$6 \times 1{,}2$	7.2 kWh
30 litres d'eau chaude	$30 \times 0{,}12$	3.6 kWh
		10.8 kWh

Deux bobines chacune de 300 W consomment pendant 18 heures : 10,8 kWh.

Supposons que la famille donne à l'occasion un dîner, le fourneau consommera plus d'énergie que d'habitude. Cela n'est toutefois pas de nature à influencer la cuisson, le fourneau consommant toujours l'énergie nécessaire pour maintenir la plaque de cuisson et le four aux températures désirées. Il n'en résultera qu'une diminution de la température du réchaud d'eau, ce qui est de peu d'importance.

Obtention d'un rendement supérieur des aliments.

Lors de la cuisson en air libre sur flammes de fournaux à bois ou au gaz, le liquide du récipient atteint une température de 100° C en

Digitized by Google

dégageant constamment de la vapeur. Lors de la cuisson de viande fraîche en air libre, à une température de 100° C, les substances extractives volatiles disparaissent avec la vapeur, ce qui nuit au goût de la viande.

Avec un fourneau électrique comprenant également un four pour la cuisson de longue durée et avec un four à cuire le pain et à rôtir on obtient les résultats suivants :

1° Grâce à la cuisson de longue durée dans le four à 90°C, faisant suite à la cuisson rapide sur plaque, la viande devient plus succulente, plus tendre et plus nutritive.

2° Le bouillon préparé dans le four à cuisson de longue durée exige une quantité moindre de viande que le bouillon préparé sur un fourneau ordinaire. Dans le premier cas, la consommation est de 2/3 kg de viande pour un litre de bouillon, dans le dernier cas de 1 kg.

3° Tandis que la viande salée réchauffée dans l'eau bouillante durcit, elle devient succulente et tendre quand on la cuit à une température constante de 90° C.

4° Comme la température dans le four à cuire le pain et à rôtir peut être réglée à volonté, on obtient une sûreté jusqu'ici inconnue, aussi bien dans la cuisson du pain que dans le rôtissage.

Economie de travail.

On réalise une économie de travail considérable en plaçant le récipient avec le liquide et la viande, le poisson, les pommes de terre, les légumes, les graines de riz, etc., sur la plaque de cuisson à 100°C, dans le four à cuisson de longue durée, sans qu'on ait besoin de remuer ou de surveiller spécialement le contenu.

Cet avantage est surtout marqué lors de la cuisson du bouillon, du gruau, de la viande salée, etc. On peut en effet, dans ce cas, placer le récipient réchauffé en quelques minutes, dans le four pour la cuisson de longue durée et l'y laisser pendant la nuit. La nourriture conserve sa chaleur et sa succulence pendant plusieurs heures, ce qui est d'une grande importance, surtout si les repas sont servis à différentes heures.

Il est à noter que ce four pour la cuisson de longue durée du fourneau « Seves » a été imité dans les fourneaux à gaz, bien que l'utilisation du four à gaz ne soit pas recommandable pendant la nuit à cause du danger d'explosion.

Toute une série d'expériences entreprises avec des menus journaliers

Digitized by Google

complets sur le fourneau « Seves », ont montré qu'en réglant la cuisson d'une manière rationnelle, on peut réduire le travail de la cuisinière de trois à quatre heures par jour.

En réalité, ce n'est que depuis qu'on peut se procurer de la chaleur constante, grâce à un four rationnel à accumulation, que la cuisson électrique est justifiée.

En Norvège, on a prêté une attention particulière à la cuisson électrique. C'est spécialement la cuisson de longue durée, qui a été étudiée à cause de ses avantages considérables. Le parlement Stortinget a même nommé une commission royale, composée de savants éminents, d'électrotechniciens et d'experts de l'art culinaire pour étudier la cuisson électrique au point de vue de la valeur nutritive, de l'économie de travail et de l'économie nationale. Près d'Oslo on a récemment construit une école ménagère qui a coûté plusieurs millions de couronnes, où la cuisson électrique est adoptée dans une large mesure.

VIII. — Comment fournir l'énergie a bon marché ?

Plus est considérable la mesure dans laquelle une usine peut être utilisée, plus sera grand aussi le nombre des kilowatt-heures entre lesquels se répartissent les dépenses fixes. Nous arriverions ainsi au prix de revient moyen le plus bas par kilowatt-heure, s'il était possible d'utiliser l'énergie d'une façon constante pendant les 24 heures de la journée, tout le long de l'année.

Lorsqu'il s'agit de fournir de l'énergie à l'agriculture ou à la petite industrie et pour les besoins domestiques, les lignes et les usines ne sont pleinement mises à contribution que pendant un temps très court.

Le maximum de charge pour l'agriculture est généralement déterminé par les moteurs, mais ceux-ci ne sont utilisés avec intensité que pendant une brève période de chaque année, c'est-à-dire à l'époque du battage. Le maximum de charge pour la petite industrie est également déterminé par les moteurs, qui sont utilisés à peu près régulièrement tous les jours. Dans les maisons d'habitation, d'autre part, la charge du moteur ne joue actuellement qu'un rôle assez peu important ; c'est le besoin de lumière qui y constitue le facteur déterminant du maximum de charge. Pour toutes ces catégories, la charge nocturne est donc faible ou nulle. Le soir et le matin, nous avons une charge assez forte pour l'éclairage. Durant les heures de la journée, nous avons quelque consommation pour la force motrice, mais pendant de longues

Digitized by Google

périodes de l'année, le réseau n'est que très peu chargé, même en plein jour.

Il y a donc de grandes parties de la journée et de l'année où l'on pourrait consommer des quantités plus considérables d'énergie, sans augmenter le maximum de charge et à des prix qui ne correspondraient qu'aux dépenses variables.

La question est maintenant de savoir dans quelle mesure il convient d'utiliser ces possibilités pour obtenir à certaines heures du jour de l'énergie électrique à un prix exceptionnellement bas et d'étudier, s'il est possible et praticable de trouver d'autres utilisations de l'énergie pour la journée de 24 heures entière. Sous ce rapport, le problème ne consiste pas seulement toutefois à établir les tarifs, mais aussi à stimuler la demande et à introduire des appareils appropriés.

Tarifs.

Les tarifs de fourniture d'énergie électrique doivent prendre pour base le prix de revient de l'énergie. Etant donné que ce prix de revient dépend tout ensemble, au début, de la puissance de charge et de l'énergie consommée, il est déjà difficile par là même, d'établir des tarifs qui suivent le prix de revient. Et il faut considérer aussi le fait que le prix de revient est plus ou moins influencé par une multiplicité d'autres facteurs encore, tels que les heures du jour et les époques de l'année où l'énergie est utilisée, la forme de la courbe de charge et sa grandeur absolue, l'égalisation de la puissance effectuée entre différents consommateurs, etc. Un tarif universel serait donc extrêmement compliqué, à supposer même qu'il fût possible de l'établir.

La tarification pour la vente de l'énergie électrique dépend, somme toute, des facteurs suivants du prix de revient :

1° *Les frais, à l'usine électrique, de l'énergie électrique produite.* — Ils se composent d'une *partie fixe* par quantité maximum utilisée par les consommateurs et par année, ainsi que d'une *partie variable* par kilowatt-heure utilisée par les consommateurs, correspondant principalement au coût du combustible. A ces frais il faut ajouter les pertes de cuivre dans les transformateurs, qui s'accroissent avec la consommation d'énergie.

2° *Les frais pour la transmission de l'énergie consommée de l'usine électrique aux différents consommateurs.* — Ils se composent des paiements d'intérêts, de l'amortissement et des frais d'entretien des stations transformatrices, des pertes de fer des transformateurs et des frais

Digitized by Google

d'exploitation et d'administration. Tous ces frais sont à considérer comme fixes et sont à répartir parmi les consommateurs par kilowatt abonné ou consommé et par année.

En outre, les tarifs doivent être suffisamment simples pour pouvoir être acceptés aisément. D'une façon générale, les tarifs appliqués jusqu'à ce jour ont été établis de manière à réaliser cette simplicité et à les adapter parfaitement aux formes de consommation les plus usuelles, à savoir l'éclairage et la force motrice.

Nous allons passer brièvement en revue divers types de tarifs, pour examiner enfin avec plus de détails un tarif répondant aux desiderata susmentionnés, concernant la vente de l'énergie à bas prix et l'accroissement de la consommation d'énergie.

1° *Prix annuel fixe par kilowatt.*

En Norvège, on souscrit en général un abonnement pour un certain nombre de kilowatts par année. A Oslo, par exemple, l'abonné paie 250 francs-or par kilowatt et par année, et peut se servir alors de ce kilowatt pendant autant d'heures qu'il le désire. La dépense est la même dans tous les cas.

Pour le contrôle, il est fait usage de limitateurs de puissance, qui, dès que la charge prévue par le contrat est dépassée, interrompent périodiquement le courant, éteignant et rallumant les lumières.

Ce tarif suppose une force hydraulique à bon marché. En Norvège même, toutefois, il commence à être abandonné, non seulement parce qu'il encourage le gaspillage d'énergie — on estime que 40 pour cent environ sont consommés en pure perte — mais aussi parce qu'il a l'inconvénient de ne pas permettre aux abonnés, dans des occasions exceptionnelles, de dépasser la puissance portée sur leur contrat.

2° *Prix par kilowatt-heure.*

En Suède, la vente d'énergie électrique s'effectue dans une large mesure sur la base d'un prix déterminé par kilowatt-heure.

Dans un grand nombre de localités, ce prix est plus élevé pour l'éclairage que pour la force motrice avec double compteur.

Dans d'autres localités, un prix plus élevé est appliqué pendant les périodes d'éclairage et un prix plus bas pour le reste de la journée. Dans ce cas, il suffit d'un compteur, mais pourvu de deux appareils enregistreurs, l'un appliquant le tarif supérieur et l'autre le tarif infé-

Digitized by Google

rieur, ainsi que d'un mécanisme d'horlogerie qui — chaque mois, en général, suivant les conditions de la lumière — règle les périodes durant lesquelles l'énergie consommée doit être comptée soit à l'un, soit à l'autre tarif.

En Suisse, il a été introduit, en outre, un troisième tarif, destiné à stimuler la consommation nocturne d'énergie.

Ces divers compteurs à tarif multiple ne sont toutefois pas absolument sûrs et nécessitent aussi un travail considérable en raison du réglage mensuel du compteur. Aussi ne sont-ils pas très populaires.

3° *Tarif mixte.*

On tend de plus en plus à adopter un tarif comportant, *d'une part*, une taxe annuelle fixe, perçue, lorsqu'il s'agit d'industries et d'autres gros consommateurs, sur le chiffre maximum de kilowatts consommés. A cette taxe fixe s'ajoute un montant variable pour la consommation d'énergie.

Pour autant qu'il s'agit de gros consommateurs d'énergie, cette forme de tarif peut être considérée comme satisfaisante. La majeure partie des frais d'énergie étant perçue comme dépense fixe, la taxe de consommation par kilowatt-heure demeure basse. Cette circonstance tend à encourager un usage prolongé, ce qui est à l'avantage à la fois du producteur et du consommateur.

Pour la vente d'énergie à des coopératives rurales, on a appliqué dernièrement, dans la Suède Centrale, une nouvelle forme de tarification séparant les frais de transmission des frais de production, les coopératives ayant des frais de répartition dans leurs réseaux. Les frais à la charge des consommateurs comprennent :

1° Les frais fixes, de production à l'usine, répartis suivant le nombre maximum de kilowatts utilisés par an.

2° Les frais variables, de production à l'usine, correspondant pour la plus grande part à l'achat du combustible et répartis suivant le nombre de kilowatts-heure utilisés.

Note. — Dans les frais sous 1° et 2° sont également comptées les pertes d'énergie (dans le cuivre) dans la station transformatrice jusqu'au consommateur individuel.

3° Les frais de transmission depuis l'usine électrique jusqu'au point de livraison à la coopérative, y compris les pertes d'énergie dans le fer des transformateurs interposés jusqu'à ce point.

4° Les frais de transmission dans le réseau de répartition, y compris

Digitized by Google

les pertes d'énergie dans le fer des transformateurs de ce réseau. Les frais 3° et 4° considérés comme fixes sont répartis suivant le nombre maximum de kilowatts utilisés par an.

Il semblerait donc indiqué d'adopter un tarif à deux parties.

Pour les petits consommateurs, ce genre de tarif n'est pas indiqué, car ils ne se soucient guère de décompter une partie appréciable des frais d'énergie sur la base d'un maximum de charge purement occasionnel. Il est à noter, en outre, que le coût des compteurs nécessaires est trop élevé pour eux.

Pour l'agriculture, on prend donc souvent pour base le nombre d'hectares de terre arable, et pour les maisons d'habitation, le nombre de lampes posées ou le nombre de pièces à éclairer, etc.

La taxe variable a été généralement maintenue jusqu'ici sur la seule base du nombre de kilowatt-heures consommés. En vue d'encourager la consommation d'énergie pendant les heures de non-éclairage, on emploie des compteurs à double tarif avec une taxe par kilowatt-heure peu élevée pour cette dernière période. Mais pour assurer le succès, la taxe doit être fixée à un taux très bas. Un tel tarif ne va pas toutefois sans risques pour l'usine électrique. En Amérique, par exemple, on a constaté que chaque semaine, le dimanche matin, un grand nombre de personnes chauffent leur bain en même temps, ce qui rend difficile le service.

4° *Tarif à trois parties.*

En ces derniers temps, il a été introduit en Suède un type de tarif qui, selon toute apparence, va prendre une importance de plus en plus grande pour l'usage à domicile. Sa base est celle-ci : l'énergie souscrite comprend :

d'une part, une certaine charge de puissance facultative, pour laquelle la taxe annuelle fixe est perçue par kilowatt et par an, indépendamment du nombre d'heures pendant lesquelles l'abonné en fait usage ;

d'autre part, la quantité d'énergie consommée en plus de cette charge et pour laquelle la taxe est calculée par kilowatt-heure.

L'énergie consommée en deçà de la charge facultative est dite *énergie de base*. Celle qui est consommée *en sus* est dite *énergie supplémentaire*.

Le tarif en trois parties comprend :

1° une *taxe fixe* par hectare arable ou par nombre de chambres et correspondant à tous les frais de transmission de l'usine électrique

Digitized by Google

aux consommateurs individuels pour la charge mise à contribution ;

2° un *prix fixe composé*, correspondant à l'énergie de base et décompté par kilowatt et par an;

3° un *prix variable composé* correspondant à l'énergie supplémentaire et décomptée, s'appliquant au kilowatt-heure consommé.

Si le consommateur ne veut pas souscrire à un abonnement de taxe fixe, il utilise tous les kilowatts-heures comme énergie supplémentaire.

Un tel tarif n'est toutefois intéressant que dans le cas où existe la possibilité d'exploiter complètement, jour et nuit, une charge déterminée et où des installations spéciales permettent la connection et la déconnection automatique d'appareils prévus pour rendre le système indépendant de la mémoire du consommateur.

IX. — Compteurs électriques.

La Centrale électrique de la ville de Stockholm a établi dans ce but un excellent compteur.

Ce compteur enregistre, d'une part, les kilowatts-heures d'*énergie de base*, et les kilowatts-heures d'*énergie supplémentaire*.

Il est fabriqué par la Société L. M. Ericsson.

Un commutateur permet automatiquement d'utiliser l'énergie de base quand elle n'est pas mise à contribution, par exemple par l'éclairage, pour d'autres fins. En installant, par exemple, un réchaud d'eau, on accumule l'énergie de base aussitôt qu'elle n'est pas utilisée pour l'éclairage ou d'autres fins ayant toujours la priorité pour son utilisation. Un fourneau accumulateur peut aussi servir de la même manière. Il y a environ 1 000 compteurs de ce genre en usage.

Nous allons donner ici quelques exemples pratiques de la façon dont fonctionne ce compteur, mais nous désirons faire ressortir maintenant l'avantage qu'il y a à ce que la majeure partie de l'énergie soit consommée comme énergie de base au prix relativement bas que celle-ci comporte, alors que l'abonné a le droit de dépasser à n'importe quel moment la quantité prévue à son contrat en payant pour l'énergie supplémentaire le prix le plus élevé. C'est là aussi un grand avantage que le compteur en question présente pour le consommateur sur le compteur limitateur de courant employé en Norvège, lequel ne permet pas l'utilisation d'une quantité de puissance supérieure à celle qui sera prévue par le contrat.

Digitized by Google

Dans une usine électrique urbaine, la même tripartition du prix de revient paraît applicable et se traduirait dans les tarifs par les postes ci-après :

1° La taxe fixe correspondant aux frais de transmission dans le réseau de répartition, taxe répartie selon la charge demandée pour les moteurs et pour l'éclairage. (Comparer 3 et 4 ci-dessus, page 777).

2° La taxe annuelle fixe des frais de production de la puissance maximum fournie en kilowatt dans l'usine (comparer 1 ci-dessus, page 777).

3° Les frais variables de production dans l'usine de l'énergie consommée en kilowatts-heures (comparer 2° ci-dessus, page 777).

Si on répartit les frais 1° et 2° sur l'énergie consommée (3), de manière que 1, 2 et 3 ne portent que sur les kilowatts-heures purs, ce prix devrait correspondre au prix du kilowatt-heure compté actuellement quand on ne paie que l'énergie consommée.

Toutefois, là où on peut utiliser l'électricité rationnellement pour le chauffage, il faudrait adopter, en plus d'un tarif au kilowatt-heure, un tarif d'énergie de base en employant un compteur automatique de la construction décrite ci-dessus. Comme on suppose que tous les frais fixes 1 et 2 sont prélevés sur les kilowatts-heures consommés, le prix de cette énergie de base, payable par kilowatt et par année, devrait être assez bas pour que la partie de l'énergie de base qui est utilisée, non pour l'éclairage, etc., mais pour le chauffage, corresponde aux frais de production variables dans l'usine électrique (voir 3, ci-dessus), principalement à la consommation de combustible.

Pour terminer je voudrais par quelques exemples illustrer le fonctionnement de ce tarif.

Exemple 1.

Famille de 5 personnes avec 4 chambres.

Eclairage — 12 lampes de 50 W chacune avec une consommation annuelle d'énergie de 200 kWh. Fourniture maximum dans tous les cas 0,6 kW. Dans le cas 1 ci-dessous, l'énergie est payée au kilowatt-heure pour l'éclairage. Dans les cas 2 et 3 par contre, 1/4 de kilowatt est utilisé également comme énergie de base pour chauffage d'eau, etc.

Cas 1.

Prix du kilowatt-heure	Francs or 0 50
Dépense totale	» 100

Digitized by Google

Cas 2.

1/4 de kilowatt à francs-or, 540 par kilowatt et par an	»	135
20 kWh d'énergie supplémentaire à francs-or 0 50		
	»	145
	»	100
il reste ..... Francs or		45

Cas 3.

Taxe fixe (voir 3 et 4 ci-dessus, page 777) pour 4 chambres à francs-or 12 chacune ..... Francs-or		48
Energie de base 1/4 de kilowatt à francs-or 350, (voir 1 et 2 ci-dessus, page 777)	»	88
Energie supplémentaire 20 kWh à francs-or 0,25 (voir 1 et 2 ci-dessus, p. 777)	»	5
Francs-or		141
Si on déduit pour l'éclairage	»	100
il reste ..... Francs-or		41

Dans les cas 2 et 3, on peut, avec 1/4 de kW pendant 18 heures de la journée, durant par exemple 300 jours de l'année (il est supposé que la famille ne peut pas utiliser l'énergie pendant 60 jours de l'année par exemple pour cause d'absence), chaque jour faire chauffer avec un rendement de 80 pour cent 37 litres d'eau de 10°C à 90°C, contre une dépense supplémentaire de 41 à 45 francs-or. On utilise à cet effet $300 \times 18 \times 1/4 = 1\,350$ kWh par année.

Le chauffage de l'eau coûte donc $\frac{45}{1350}$ ou 3 1/2 centimes-or par kWh.

Le prix moyen de l'éclairage et du chauffage de l'eau sera donc d'environ $\frac{540}{4 \times 1350}$ ou de 10 centimes-or par kWh.

Dans le cas 2, le compteur travaillera comme suit :

1° Tant que 5 à 7 lampes — soit 250 ou 600 W — seront connectées, l'appareil de chauffage se trouvera automatiquement déconnecté. Le compteur n'enregistrera que les kWh consommés par les lampes au delà de 250 W.

Digitized by Google

2° D'autre part, si moins de 5 lampes, 3 par exemple — soit 150 W — sont connectées, l'appareil de chauffage sera déconnecté ou connecté.

Pendant la première période, l'appareil de chauffage — 250 W — et les trois lampes — 150 W — sont connectés, la consommation étant de 400 W.

Pendant la seconde période, l'appareil de chauffage est déconnecté et 3 lampes seulement sont connectées.

Pendant les périodes 3 et 4, la même opération se répète et ainsi de suite.

La consommation moyenne n'est donc que de 250 W. Pendant la première période, il y aura certainement à ajouter un certain nombre de kWh comme énergie supplémentaire, mais ils seront à déduire ensuite pendant la période 2, en sorte que le compteur n'aura pas le temps nécessaire pour enregistrer l'énergie supplémentaire.

Exemple 2.

Une famille de six personnes consomme 30 litres d'eau chaude par jour.

6 personnes consomment pour la cuisson	$6 \times 1{,}2$	7,2 kWh
30 litres d'eau chaude	$30 \times 0{,}12$	3,6 kWh

Deux bobines chacune de 300 W consomment pendant 18 heures 10,8 kWh.

Supposé que la durée de connection du fourneau et de l'appareil de chauffage d'eau est de 18 heures chaque jour, de manière à ce qu'ils puissent être déconnectés tout au plus pendant 6 heures de la journée, l'une des bobines de fourneau pourra utilement être munie de 200 W et l'autre de 400 W, celle de l'appareil de chauffage d'eau enfin de 400 W. Pendant 18 heures sont donc fournis les 10,8 kWh d'énergie électrique nécessaires. Une énergie constante de 600 W est donc utilisée jour et nuit.

Exemple 3.

Abonnés à l'éclairage électrique et à des appareils pour divers usages domestiques.

Un abonné qui utilise :

pour l'éclairage, 10 lampes de 50 W, maximum ..... 500 W

Digitized by Google

pour le repassage ..... 500 —
pour le nettoyage au moyen de l'aspirateur de poussière . 200 —
pour la cuisine à l'aide d'un fourneau dont une bobine de résistance de 200 W est connectée en permanence, et une 300 W occasionnellement ..... 500 —
pour un four à cuire du pain et à rôtir ..... 600 —
pour un appareil de chauffage d'eau ..... 300 —

Quand le four à cuire du pain et à rôtir est connecté, la bobine de résistance de 200 W du fourneau est déconnectée par un commutateur à main.

L'appareil de chauffage d'eau est automatiquement déconnecté, aussitôt que la quantité employée pour d'autres usages dépasse le montant de l'abonnement à une certaine puissance de base, par exemple à 500 W, mais il est automatiquement connecté à nouveau dès que cette consommation n'est plus atteinte.

La résistance de 200 W du fourneau est constamment connectée pendant la totalité des 24 heures de la journée, à l'exception du temps où le four à cuire du pain est connecté.

De minuit à 6 heures du matin, l'appareil de chauffage d'eau est connecté.

La puissance totale 500 W est donc complètement utilisée, sans énergie supplémentaire.

De 6 à 9 h sont connectées, outre les 200 W du fourneau, 3 lampes de 50 W et temporairement l'appareil de chauffage d'eau, en sorte que sa consommation moyenne pendant cette période est de 150 W. La plaque de cuisson du fourneau est au matin si chaude que la bobine de résistance de 300 W, n'a pas besoin d'énergie électrique. La puissance totale de l'abonnement est utilisée sans énergie supplémentaire.

De 9 à 10 h, les 200 W de l'aspirateur de poussières sont connectés, outre les 200 W du fourneau. L'appareil de chauffage d'eau l'est par intermittence, en sorte que sa consommation moyenne pendant cette période est de 100 W. L'abonnement est utilisé tout entier, sans énergie supplémentaire.

De 10 à 12 h, les 2 bobines de résistance du fourneau, 200 + 300 W sont connectées. Nous admettons que la cuisson de dîner se fait pendant ce temps. L'abonnement est utilisé tout entier, sans énergie supplémentaire.

De 12 à 14 h, l'appareil de chauffage d'eau est constamment connecté, outre les 200 W du fourneau. L'abonnement est utilisé tout entier, sans énergie supplémentaire.

Digitized by Google

De 14 à 15 h, les 200 W du fourneau sont déconnectés à la main, et le four à cuire du pain et à rôtir de 600 W est connecté, 100 W d'énergie supplémentaire sont utilisés.. 100 Wh

De 15 à 16 h, outre les 200 W pour le fourneau et les 100 W pour l'éclairage, le fer à repasser de 500 W est connecté pendant 2 fois 15 minutes. De plus, l'appareil de chauffage d'eau a été connecté automatiquement en même temps que le fer à repasser était déconnecté. L'abonnement est utilisé tout entier, l'énergie supplémentaire est de... 200 Wh

De 16 à 18 h, sont connectés, outre 200 W pour le fourneau, 100 W pour l'éclairage et l'appareil de chauffage d'eau par intermittence, en sorte que la consommation moyenne de celui-ci est pendant ce temps de 200 W. L'abonnement est utilisé sans énergie supplémentaire.

De 18 à 19 h, sont connectés les 300 W des bobines de résistance du fourneau, ainsi que 200 W pour le fourneau et 300 W pour l'éclairage. L'abonnement est utilisé tout entier et l'énergie supplémentaire, est de 300

De 19 à 22 h, sont connectés 300 W pour l'éclairage outre les 200 W pour le fourneau. L'abonnement est utilisé tout entier sans énergie supplémentaire.

De 22 à 24 h, sont connectés constamment, outre 200 W du fourneau, 300 W pour l'appareil de chauffage d'eau. L'abonnement est utilisé tout entier sans énergie supplémentaire.

Total de l'énergie supplémentaire en Wh 600

Outre 1/2 kW d'énergie de base, il est donc consommé 0,6 kWh d'énergie supplémentaire. En admettant que cette courbe se répète pendant 300 jours, la dépense pour une famille de 6 personnes sera :

500 W à 54 francs-or par kW et par an	270
180 kWh à 50 centimes-or	90
20 kWh à 50 centimes-or pour buts extraordinaires.	10
Francs-or.....	370

Pour cette somme, on obtient par conséquent de la lumière pour

Digitized by Google

6 lampes de 50 bougies, le chauffage à 90°C environ de 40 l d'eau, ainsi que l'énergie électrique nécessaire pour la cuisson des aliments, le nettoyage au moyen de l'aspirateur de poussière et le repassage.

Par ces exemples j'ai voulu démontrer, que ce nouveau compteur introduit par la Centrale Electrique de Stockholm, présente les conditions nécessaires pour l'élaboration de nouveaux tarifs, qui sont sans doute de la plus haute importance pour la fourniture d'énergie, étant donné qu'ils rendent possible une meilleure exploitation du courant électrique.

Jusqu'ici, l'évolution de l'industrie électrique a été dirigée surtout par les grands fabricants. Ce n'est pas une critique que je leur adresse en affirmant qu'il est grand temps que les usines électriques se chargent de ce rôle prépondérant. Je reconnais volontiers que l'œuvre accomplie jusqu'ici par les fabricants électrotechniques, somme toute, a été très précieuse. Mais justement la question des tarifs est un exemple qui traduit bien ma pensée. L'électricité est devenue un élément vital d'une importance sociale fondamentale. La condition décisive d'une activité de grande envergure est un tarif approprié. Il paraît assez inutile de discuter de pareils tarifs aussi longtemps qu'on n'a pas à sa disposition un compteur sûr et rationnel. L'œuvre remarquable de la Centrale Electrique de Stockholm consiste, à mon avis, à avoir dépensé des sommes considérables pour créer de nouveaux modèles.

Ce n'est qu'une fois les travaux préparatoires terminés que la Centrale Electrique put intéresser un fabricant. Il en fut d'ailleurs de même avec le fourneau Seves.

Je ne mentionne ceci que pour montrer combien il est important que l'initiative, pour autant qu'il s'agit du développement de la fourniture d'énergie, soit prise par les usines électriques et par les organisations dirigeantes.

Pour terminer, je voudrais faire ressortir de quelle importance est la diminution des frais de fabrication des différents appareils du domaine de l'électricité, ce qui sans doute ne pourra être atteint que par la production extensive sur une grande échelle. Il serait donc peut-être justifié d'étendre la collaboration des usines électriques au delà des frontières nationales. En tout cas, un échange continu des expériences faites dans ce domaine par les différents pays, serait sans aucun doute très fécond, surtout pour un pays travaillant dans des conditions relativement étroites comme le mien.

Digitized by Google

L'ÉLECTRICITÉ A LA FERME[1]

par M. BORLASE MATTHEWS.

Cela a été un grand plaisir pour moi d'entendre la conférence de M. le Dr EKSTRÖM, sur les expériences qu'il a faites en Suède.

J'ai eu l'occasion de visiter sa ferme, et je puis vous témoigner de l'exactitude de ce qui vous a été dit et présenté.

J'ai été aussi particulièrement heureux, de l'occasion de voir l'application des toutes dernières méthodes françaises au cours de mes récentes visites en votre pays.

Rien n'est plus encourageant pour qui a pris à cœur la cause des applications de l'électricité en agriculture, que d'apprendre de ses collègues les résultats qu'ils ont obtenus et les méthodes qu'ils ont employées.

Dans mon pays, au cours de l'année dernière, les applications de l'électricité à l'agriculture ont fait un pas définitif en avant, les Ingénieurs des grandes stations électriques ayant étendu leurs secteurs de distribution.

Jadis un district rural était regardé comme ne donnant aucun profit. Il y a quelque temps, j'ai demandé à M. ESCHWEGE quelle était son opinion à cet égard. Il me répondit qu'on définit d'ordinaire le secteur rural comme étant celui qui ne paie pas; mais grâce au développement des lignes de transport, un si grand nombre de fermes et de petites industries auxiliaires utilisent l'énergie électrique que les régions desservies échappent nettement à cette définition péjorative.

Le Dr EKSTRÖM même a montré qu'en Suède, les secteurs ruraux sont plus rémunérateurs que les secteurs urbains.

Je vais vous montrer à l'exemple du Dr EKSTRÖM et de M. BITOUZET, un film cinématographique pris dans ma ferme, de 250 hectares, complètement électrifiée. Vous aurez ainsi une idée assez claire de ce que nous réalisons en Angleterre.

Je remercie M. BITOUZET de l'assistance qu'il m'a apportée, pour traduire les titres et fournir des explications sur le film.

M. BORLASE MATTHEWS présente un film montrant les applications de l'électricité à l'agriculture; dans sa ferme de Greater Felcourt, East Grinstead.

---

(1) Communication présentée à la Société française des électriciens le 4 mai 1927.

Digitized by Google

Il présente un *incubateur électrique, comportant un ventilateur : 2 420 œufs sont couvés en même temps.*

L'appareil n'a que 2,25 m² et 80 cm de profondeur. Le type courant de l'appareil Mammouth pour la même capacité, exige un encombrement sept fois plus grand. Une autre caractéristique importante de la couveuse électrique avec ventilateur, est l'égale distribution de la chaleur et la ventilation uniforme. Le ventilateur force l'air chaud à circuler dans toutes les parties de la chambre contenant les œufs, maintenant chaque compartiment à une température convenable. Les œufs n'ont pas besoin d'être refroidis, car ils ne sont pas confinés dans un compartiment clos et étanche. Un couvage continu peut ainsi être assuré, les plateaux étant couvés chacun à leur tour. La coutume est de garnir certains plateaux deux fois par semaine, ce qui donne ainsi une couvée d'un sixième de la capacité de l'incubateur tous les trois ou quatre jours.

Une éleveuse comporte quarante-deux compartiments, contenant chacun soixante-quinze poussins. Dans le centre de chaque compartiment est placé un radiateur. Avec ce type d'éleveuse, les pertes en poussins élevés n'ont pas dépassé quatorze pour cent.

Le poulailler est éclairé à la lumière électrique. L'expérience montre que les poules ne font pas plus d'œufs par année, mais que la production est augmentée au moment de l'année où ils sont au prix le plus élevé. Ce procédé ne comporte aucun forçage de la volaille; en fait, il réalise seulement une journée d'égale durée pendant toute l'année, de façon à donner à la volaille dix heures de sommeil par nuit. La santé générale de la volaille semble être meilleure que dans les conditions ordinaires.

L'éclairage est réglé par la commande mécanique, car de la régularité du traitement dépend le succès de la méthode. Bien que des horloges à bon marché puissent être utilisées dans ce but, les interrupteurs à horloges avec remontage automatique comportant un dispositif astronomique sont de beaucoup les plus satisfaisants pour les grandes fermes d'élevage de volailles.

L'horloge est équipée avec un dispositif automatique d'obscurcissement qui réduit la lumière pendant une courte période avant la pleine ouverture à la nuit et avant l'extinction complète au matin, produisant ainsi un crépuscule et une aurore artificiels.

L'éclairage électrique des étables est un des usages les plus populaires de l'électricité dans la ferme, non seulement parce qu'il sup-

Digitized by Google

prime les risques d'incendie, mais parce qu'il épargne au moins une demi-heure par jour, soit un tiers du temps nécessaire pour donner la nourriture aux animaux.

Lorsqu'un lait de haute qualité est obtenu, le capsulage électrique est effectué dans le minimum de temps par de petits appareils de fonctionnement simple.

L'estimation des corps gras est une importante garantie pour le fermier, car elle est susceptible de le protéger de toute poursuite. Elle lui fournit aussi de sérieux renseignements de nature à le guider dans la nourriture rationnelle du troupeau. Dans la majorité des laiteries importantes, l'opération est effectuée par centrifugeage.

En équipant un séparateur de crème avec un petit moteur électrique, on libère le laitier d'un travail considérable et pénible. Le moteur nécessaire dans une ferme moyenne est d'environ 1/6 ch ; il est susceptible de séparer la crème de 1 350 litres de lait par kilowatt-heure. Aucune source d'énergie ne peut se comparer au moteur électrique pour ce travail. Il y a lieu de noter aussi le fait important qu'un séparateur exige une marche très régulière pour produire la plus grande quantité de crème avec une quantité de lait déterminée, et que le moteur électrique est sans rival, lorsqu'il est nécessaire d'avoir une vitesse constante.

Le moteur du séparateur de crème peut être aussi utilisé pour actionner la baratte. La baratte est conduite à l'aide d'une courroie montée sur une petite poulie du séparateur de crème et attaquant une poulie d'environ 45 cm de diamètre montée sur l'arbre de la baratte. Le principal avantage de la conduite de la baratte en commun avec celle du séparateur est, non seulement que le séparateur comme la baratte est, en pratique employé quotidiennement, mais ce procédé impose un arbre intermédiaire, la vitesse du moteur étant trop élevée pour l'attaque directe. Avec un kilowatt-heure d'électricité on peut baratter et travailler 80 kg de beurre environ.

Un grand nombre de travaux expérimentaux ont déjà été faits au sujet des différentes méthodes de culture de la terre par l'électricité et il a été démontré que l'électricité peut concurrencer favorablement le labourage par traction animale ou par la vapeur.

Il y a actuellement plus de deux cents groupes de labourage électrique dans les différentes fermes du Monde. L'avantage du labourage électrique réside dans le fait que l'on dispose d'une quantité pratique-

Digitized by Google

ment illimitée de puissance au crochet de la charrue et que le coût par hectare est considérablement plus bas que par l'emploi d'un combustible quelconque. La plupart des charrues électriques en service aujourd'hui sont capables de labourer de grandes superficies de terrain. Dans le petit modèle, « à câble de halage », l'équipement consiste en un véhicule à deux roues sur lequel est monté un moteur de 12 ch. L'un ou l'autre des deux tambours d'enroulement montés sur le véhicule, peut être attaqué par le moteur. L'équipement complet peut être amené sur le terrain par un tracteur ou par deux chevaux. Il travaille selon le principe « round about » modifié. Une charrue à double soc et à double effet est déplacée par va-et-vient à travers le champ par l'enroulement d'un câble d'acier sur les deux tambours actionnés par le moteur. Des poulies appropriées, amarrées par des ancrages, sont placées aux angles et sur les côtés du champ pour guider les câbles. Une moyenne de deux hectares par jour peut être labourée avec ce petit équipement.

Le fermier qui s'engage dans l'emploi de l'électricité, commence généralement par un ou deux moteurs transportables, ce qui réduit le nombre de moteurs nécessaires. La principale raison du succès des moteurs transportables réside dans le fait qu'ils consomment seulement la quantité de puissance nécessaire à l'exécution du travail particulier demandé et peuvent ainsi être employés pour beaucoup de travaux agricoles différents.

Un des plus grands bienfaits de l'électricité réside, pour le fermier, dans l'introduction du procédé de fanage des foins sans les rayons du soleil.

A l'emplacement où les meules sont élevées, on établit des conduits ou canaux recouverts, munis d'ouvertures environ tous les trois mètres. Ces conduits sont construits en découpant une tranchée dans le sol et en la recouvrant avec des pièces de bois. La terre provenant du creusement de la tranchée est rejetée sur les panneaux de bois et rend ainsi le conduit étanche. Des prolongements en élévation du conduit sont ménagés aux ouvertures afin de permettre l'arrivée de l'air dans les cavités créées dans les meules placées au-dessus de ces ouvertures.

On place de grands tambours au-dessus des conduits verticaux qui s'élèvent au fur et à mesure que la hauteur de la meule augmente. Au-dessus de ces cavités un tambour est fixé, dans le but de constituer un conduit étanche à l'intérieur de la meule.

La meule est alors élevée par le procédé ordinaire et, lorsqu'elle

Digitized by Google

arrive au niveau de la partie supérieure des tambours, ceux-ci sont retirés par le haut, de façon à permettre de continuer la construction de la meule. Quand le conduit a atteint environ les deux tiers de la hauteur totale de la meule, le tambour est retiré et des bandes de treillage sont placées sur l'orifice pour éviter la chute de l'herbe et le remplissage du conduit.

La meule est alors terminée par le procédé ordinaire. Un ventilateur électrique force l'air à traverser les conduits vers l'intérieur de la meule pour régler l'action bactérienne.

ventilateur électrique transportable, qui est actionné par un moteur

ventilateur électrique transportable, qui est actionné par un moteur

électrique.

La température est lue et notée deux fois par jour au moyen de thermomètres placés dans des tubes en acier enfoncés à l'intérieur des meules à environ un mètre de profondeur.

Le ventilateur fonctionne seulement trente minutes par jour pendant neuf jours.

Ordinairement, il est nécessaire de ventiler pendant environ une demi-heure chaque vingt-quatre heures pendant neuf jours, de manière à maintenir la température dans les limites convenables. Pour les meules de dimensions courantes, il est nécessaire d'employer un ventilateur capable d'absorber 5 ch à pleine charge. Ce traitement n'est pas limité aux foins mais peut être aussi employé avec succès pour les céréales ordinaires. Les meules de céréales sont construites de la même manière. La mise en meule peut être faite de suite après le fauchage ; on évite ainsi la nécessité de l'engrangement.

Une grande quantité de meules ont été séchées avec plein succès par cette méthode dans les cinq dernières années, et lorsque du foin séché artificiellement a été donné en nourriture au bétail concurremment avec du foin séché au soleil, le bétail a marqué une préférence pour le premier. On pourrait supposer que le transport de l'herbe contenant une proportion élevée d'humidité entraîne une dépense supplémentaire élevée. En pratique, néanmoins, on constate que l'herbe est très facile à charger et d'une façon plus compacte. En outre, un chargement de foin séché au soleil n'a jamais constitué une charge normale pour un tracteur ou une paire de chevaux.

Le battage est un des plus importants travaux agricoles susceptible d'être exécuté par l'électricité. La vitesse constante à laquelle le moteur fonctionne permet d'obtenir une qualité plus uniforme des grains

Digitized by Google

et moins de grains brisés, de plus le rendement de la batteuse électrique est généralement supérieur de 5 pour cent à celui du battage ordinaire. Comme avantages accessoires, le moteur électrique est léger, transportable, nécessite le minimum de surveillance, est toujours prêt à fonctionner.

L'équipement pour batteuse peut être prévu, soit avec moteur fixé sur la machine, soit avec commande par moteur transportable.

Le prix moyen du battage de 50 kg de blé pour une batteuse de dimensions moyennes est d'environ 0,40 fr., tandis que les récents essais faits avec tracteur à huile lourde ont donné comme dépense, y compris intérêts et amortissement, 2,90 fr. pour 50 kg.

Digitized by Google

L'ÉLECTRIFICATION RURALE DANS LA RÉGION PARISIENNE [1]

par M. BITOUZET.

Une Société industrielle s'est créée voici moins de deux années pour faire métier d'entrepreneur de labourage et pour vivre de ce métier; elle a pris en charge des matériels de labour; elle achète du courant électrique aux secteurs et, d'autre part, elle traite à forfait à tant l'hectare suivant la profondeur et suivant les conditions économiques du moment avec l'agriculteur.

La Société en question a donc les préoccupations d'un entrepreneur ordinaire, préoccupations qui sont de trois ordres : avoir de bon matériel, de bon personnel et des clients.

Le matériel. — La question du matériel est de beaucoup à l'heure actuelle la plus grave.

On pourrait croire que le nombre de types de matériel de labourage électrique est particulièrement faible, étant donné que le marché en est pour l'instant extrêmement réduit; il n'en est rien parce que dès maintenant on trouve chez les constructeurs des matériels employant des moteurs dont la puissance va de 5 à 120 ch, en passant par les intermédiaires de 20, 30, 50 et 80 ch.

Un pareil choix dans un matériel qui est à ses premiers débuts de fonctionnement, est, nous semble-t-il, l'indice le plus sûr de la foi des constructeurs dans l'avenir de ce nouveau genre d'outillage.

L'ensemble des matériels dont dispose à l'heure actuelle l'entreprise en question comporte :

— Trois matériels, type Société générale agricole, chaque matériel comprenant deux treuils pesant respectivement 23 T environ, comportant un moteur de 100 à 120 ch. Ce type actionne la charrue par va-et-vient, chaque treuil tirant successivement pendant que le tambour de l'autre treuil reste libre sur son axe.

— Quatre matériels, type Compagnie d'entreprises électromécaniques chaque matériel comportant un seul treuil de 12 T avec moteur de 40/60 ch; le treuil actionne la charrue par câble fermé sur lui-

(1) Communication présentée à la *Société Française des Électriciens*, le 4 mai 1927.

Digitized by Google

même à l'aide de poulies de renvoi et recevant du treuil, par changement de sens de rotation du moteur, un mouvement de va-et-vient (type dit round-about).

— Un matériel, type Société Méridionale d'électro-motoculture, comportant comme le premier deux treuils tirant alternativement la charrue, chacun de ces treuils pesant quatre à cinq tonnes et possédant un moteur de 30 à 40 ch.

Je désire ne donner que les résultats obtenus industriellement pendant cette seconde année de pratique;

— avec un matériel Société Générale Agricole on effectue, en moyenne par journée de travail, de 3 à 3,5 ha de labour profond;

— avec un matériel Compagnie d'Entreprises électro-mécaniques, on effectue, en moyenne, par journée de travail, 1,25 ha de labour profond;

— avec un matériel Société Méridionale, d'Electro-Motoculture, on effectue, par journée de travail, de 1,5 à 2 ha de labour profond.

Travail de nuit. — Ces résultats paraissent devoir être augmentés sensiblement si, comme on peut l'espérer, le travail de nuit s'établit de façon régulière.

Cette question du travail de nuit semble conditionnée à peu près exclusivement par celle de l'éclairage; il faut non seulement éclairer les raies devant la charrue, mais également déterminer, à l'aide de points lumineux, les limites de la pièce et cette détermination est souvent difficile dans des pièces de forme irrégulière.

Contrairement à ce que l'on craignait, le rendement du travail de nuit n'est pas inférieur à celui du travail de jour; au contraire, le conducteur, isolé par l'obscurité de tout ce qui n'est pas son rayage, à l'abri des distractions que constituent les passagers de la route, les curieux, etc... donne, sans fatigue supplémentaire, un effort remarquablement soutenu.

Obstacles. — Le chapitre des obstacles est assez restreint; il comporte les difficultés de terrain et les incidents de matériel.

Les incidents de terrains consistent en embourbages et obstacles cachés : racines, rochers, masses argileuses.

Les embourbages viennent, d'une façon très générale, d'une méconnaissance de la pièce à labourer; ils se produisent pour les treuils et les cabines de transformateurs. On en évitera la plupart dès la seconde campagne de labour sur les pièces intéressées, les parties molles ayant été repérées au cours de la première campagne.

Digitized by Google

Les obstacles souterrains qui constituaient de réelles difficultés avec les treuils à vapeur, perdent de leur importance avec les treuils électriques de grande et moyenne puissance.

L'effort supplémentaire que peut donner le moteur électrique, suffit généralement pour vaincre une grande partie de ces obstacles. Pour les autres, l'appel de courant excessif provoque le fonctionnement du disjoncteur à maximum et rien de plus.

Les accidents de matériel n'offrent pas de caractéristiques bien précises, et dépendent beaucoup des types employés. L'incident banal est la rupture du câble de traction, auquel il est remédié sans difficulté par une épissure.

On peut signaler, à titre de curiosité, que les câbles souples à 5 000 V qui, dans les matériels Société Générale Agricole, paraissaient devoir constituer un point faible de l'ensemble, résistent admirablement, malgré le rude service qui leur est demandé.

Les accidents de cabines de transformateurs sont également nuls ou à peu près, surtout depuis que l'on a renoncé à faire des prises volantes sur les lignes de transport pour installer des prises fixes avec sectionneurs en tête de la canalisation de labourage.

Le personnel. — Le recrutement du personnel ne va pas sans certaines difficultés et l'entreprise n'a pu l'assurer dans des conditions satisfaisantes, qu'en puisant dans l'important réservoir de main-d'œuvre, constitué par le personnel des maisons auxquelles nous confions généralement nos installations de réseaux.

On a tout d'abord fait appel à de bons ouvriers d'usine, pensant qu'en cette matière l'industriel primait l'agricole; nous avons dû en revenir. Si les ouvriers d'industrie se montraient généralement « débrouillards », ils ne tardaient pas à trouver fastidieux et fatigant le travail de labour et, d'une façon générale, estimaient que les régions agricoles manquaient de cinémas.

D'autre part, l'ouvrier purement agricole s'est révélé comme manquant souvent d'initiative et se trouvait arrêté par des incidents mécaniques ou électriques de très faible importance.

Le type satisfaisant paraît être l'homme d'origine terrienne, ayant quelques années de séjour en usine comme mécanicien ou électricien, mais dans des usines éloignées des grands centres industriels.

La difficulté de recrutement s'accentue pour ce qui concerne les contremaîtres chefs de chantier; notre espoir est de trouver dans l'ensemble du personnel subalterne des hommes ayant les qualités nécessaires pour surveiller de façon continue trois, quatre ou cinq chantiers

Digitized by Google

de labourage fonctionnant à des distances quelquefois considérables. Le temps nous aidera sans aucun doute à effectuer ce travail de sélection.

Le principe de la rémunération du personnel est une mensualité fixe relativement basse et une prime élevée par hectare labouré; cette formule, bien que tout à fait rationnelle, ne va pas sans difficulté provenant du fait que le mauvais temps, les incidents d'exploitation créent des journées creuses, c'est-à-dire sans prime, et ces arrêts où le personnel n'est pour rien ne vont pas sans provoquer quelquefois chez lui de la mauvaise humeur.

En résumé, il apparaît nettement que l'on irait à des déboires, si l'on ne se réservait pas un choix assez large dans les hommes que l'on veut amener au métier de laboureur industriel.

La clientèle. — Nous avons ces temps derniers, demandé à un certain nombre des agriculteurs chez qui sont effectués des labours de nous dire très franchement, sans aucun ménagement, ce qu'ils pensaient du travail effectué chez eux.

Je suis heureux de pouvoir vous faire connaître l'unanimité absolue des appréciations que nous avons recueillies :

Le travail de labour est remarquablement bien fait et ne donne pas lieu à la moindre critique, même certains endroits difficiles, notamment dans les pointes des pièces, ont été travaillés dans des conditions que, de leur propre aveu, les agriculteurs n'avaient osé espérer.

Il y a eu quelques retards sur les prévisions, mais ils étaient dus à des difficultés de construction de ligne et il est hors de doute qu'une fois les lignes établies, l'entreprise fera face sans difficulté aux engagements qu'elle a pris, en ce qui concerne le nombre d'hectares à labourer par campagne.

En résumé, en matière de labourage électrique, le matériel donne satisfaction, le personnel se met rapidement au point et la clientèle est enchantée.

Ce n'est donc pas dans les questions d'ordre technique que réside la difficulté, elle est uniquement d'ordre financier.

Or, qui peut faire l'effort financier ? Ce n'est pas l'Etat qui fait tout ce qu'il peut, puisque l'année dernière plus de cent millions ont été mis à la disposition de l'agriculture sous forme de subventions gratuites ou de prêts à taux réduit; mais ce chiffre, si important qu'il paraisse, est bien faible devant l'ordre de grandeur du programme à réaliser.

Les distributeurs d'électricité, qui sacrifient eux aussi tous les ans

Digitized by Google

de fortes sommes au développement des réseaux ruraux, sont également au bout de leur effort, en raison notamment de leurs obligations d'étendre, bon gré mal gré, les réseaux urbains.

Ceux qui doivent faire l'effort nécessaire, ce sont les principaux, sinon les seuls intéressés : les agriculteurs. Et ceci est une vérité assez difficile à faire admettre de prime abord à des hommes qui, de tout temps, ont employé leurs disponibilités à augmenter l'étendue de leur exploitation sans se préoccuper outre mesure d'en perfectionner l'outillage, alors que les industriels avec lesquels ils se plaignent de n'être pas traités, en France, sur un pied d'égalité, ont depuis longtemps déjà adopté très généralement la méthode inverse.

Cette vérité est cependant comprise dès maintenant par un groupe d'agriculteurs éclairés, qui collaborent avec nous pour qu'elle se répande de plus en plus dans le monde agricole, et nous avons le ferme espoir d'amener la très grande généralité des agriculteurs aux efforts financiers, grâce auxquels l'agriculture sera vraiment une industrie.

Digitized by Google

PROGRÈS RÉCENTS AUX ÉTATS-UNIS DANS LA TRANSMISSION A HAUTE TENSION PAR LES LIGNES AÉRIENNES[1]

PAR J.-B. WHITEHEAD

Doyen de l'Ecole d'Ingénieurs à l'Université Johns Hopkins, Professeur américain d'échange auprès des Universités françaises.

Le conférencier fait ressortir l'influence prédominante prise, aux États-Unis, par la recherche expérimentale dans le développement des transmissions de l'énergie électrique à haute tension. Il projette deux séries de clichés, montrant, l'une les résultats récents obtenus dans un laboratoire industriel, l'autre les résultats de ses propres recherches au laboratoire d'électrotechnique de l'université Johns Hopkins à Baltimore.

Le fait que la recherche expérimentale a été aux Etats-Unis un des plus importants agents des progrès réalisés dans les applications de l'électricité et du magnétisme, paraît à première vue assez surprenant, car, si nous laissons de côté les ouvrages remarquables de quelques savants renommés, tels que HENRY et GIBBS, l'histoire de la recherche scientifique ne remonte dans ce pays qu'aux dernières années du dix-neuvième siècle. Et ce n'est que récemment que la valeur de la recherche dans les sciences physiques a reçu une reconnaissance générale et publique.

Mais l'électricité et le magnétisme sont parmi les agents les plus mystérieux de la nature, et les découvertes des applications nouvelles ne peuvent être faites que par des investigations scientifiques et expérimentales. Aussi, les fabricants américains d'appareils électriques se sont bientôt rendu compte que les laboratoires de recherche constituent un élément essentiel de leurs industries. L'exemple qu'ils ont donné a été bientôt suivi par d'autres, de sorte que maintenant le nombre de ces laboratoires de recherche industrielle est aux Etats-Unis approximativement de quatre cents. A citer, parmi les plus importants, ceux de la General Electric Co., à Schenectady, N. Y., de la Vestinghouse Electric and Manufacturing Co., à Pittsburg, Pa, et de la

---

(1) Résumé d'une communication présentée à la *Société Française des Electriciens*, le 1er juin 1927.

Digitized by Google

Western Electric Co., à New-York City. Chacun d'eux emploie des centaines d'agents, et les données qu'ils permettent de recueillir, contiennent souvent des résultats d'une grande valeur scientifique.

Pour tirer parti de ces laboratoires, un grand nombre de jeunes gens possédant de fortes connaissances en électrotechnique et en physique sont nécessaires. Les universités et les écoles polytechniques se sont donc multipliées en proportion du nombre des laboratoires. Plusieurs grandes universités ont donné une extension spéciale à ces études préparatoires. Certains laboratoires ont établi des liaisons assez étroites avec les fabricants.

Sans doute, cette recherche d'une coopération entre les universités et l'industrie a eu pour résultat d'augmenter encore la considération accordée à la recherche pure.

Ainsi sont nées quelques fondations indépendantes et puissantes, telles que la Engineering Fondation et le Mellon Institute, exclusivement consacrés aux recherches techniques. D'autre part, il existe des institutions d'Etat telles que le National Bureau of Standards et le National Research Council. Dans une autre classe, on rencontre diverses sociétés scientifiques d'ingénieurs et des compagnies pour la distribution de l'énergie électrique, par exemple le National Electric Light Association, l'American Institute of Electrical Egineers, l'American Society for Testing Materials, etc., dont les membres apportent aux recherches des contributions importantes et nombreuses.

Dans la première série de projections présentées par le conférencier, nous citerons les suivantes, montrant les résultats récents obtenus dans un laboratoire industriel.

Le laboratoire expérimental à deux millions de volts de la General electric Co., dont les éléments essentiels sont le transformateur, l'éclateur et le grand condensateur isolé de la terre, constituant à eux trois un « générateur d'éclairs ».

Les expériences réalisées avec cette installation : arcs, étincelles à deux millions de volts, et d'une longueur de six mètres. Des éclatements d'isolateurs de types divers, montrant le développement des formes différentes des cornes et des anneaux de protection. Les expériences à échelle réduite sur la valeur des paratonnerres pour bâtiments et des fils de terre pour lignes aériennes. Ces expériences ont permis à M. Peek, Jr., ingénieur électricien de la General Electric Co., de tirer des conclusions nombreuses et importantes sur la

Digitized by Google

nature intime de l'éclair et sur les valeurs des grandeurs électriques mises en jeu. Suivaient des exemples frappants relevés sur les lignes de transmission à 220 kV : pylônes, isolateurs, disjoncteurs, interrupteurs à huile, de types divers. Quelques vues de sous-stations en plein air à 220 kV, en particulier à Vaca, de la Pacific Gas and Electric Co., en Californie. On y remarquait l'absence de paratonnerres sur les lignes et sous-stations à 220 kV. Les lignes du grand réseau de la P. G. E. Co. montrent en permanence l'effet corona.

Selon les ingénieurs, cet effet protège notablement la stabilité du système contre toute sorte de troubles. La perte constante d'énergie due à la corona protectrice atteint 225 kW.

Dans la deuxième série de projections, le conférencier donna le résultat de ses études récentes sur les propriétés électriques du papier imprégné tel qu'on l'emploie dans les câbles souterrains à haute tension. Elles portaient particulièrement sur la question obscure de l'influence des résidus d'humidité et d'air sur les propriétés isolantes du papier imprégné.

N.D.L.R. — La Société Française des Electriciens, publie en ce moment, en brochure séparée, le manuscrit complet de ces dernières études de M. le professeur WHITEHEAD.

Digitized by Google

NOTE TECHNIQUE SUR LA VISITE DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS AUX INSTALLATIONS ÉLECTRIFIÉES DES MINES DU NORD ET DU PAS-DE-CALAIS

du 29 mai au 1er juin 1927

par M. Drouin.

I° Compagnie des mines d'Anzin.

Station Centrale. — La Centrale, construite au bord de l'Escaut, comprend 3 groupes Schneider-Zœlly de 10 000 kW, avec condenseurs Delas. Elle est prévue pour 6 groupes.

Le combustible employé est du poussier à 12 pour cent de matières volatiles, 23 pour cent de cendres et de 3,5 pour cent d'eau. Son pouvoir calorifique est de 6 400 cal/kg. Il arrive dans des wagons à trémies, qui le déversent dans des trémies au-dessous desquelles circule un convoyeur à tablier, qui le conduit dans des silos de 6 000 tonnes, d'où un système de distributeurs, vis et norias, le conduit à l'usine de pulvérisation où il passe dans un séchoir horizontal, puis dans un séparateur magnétique, et ensuite dans les pulvérisateurs. Il est enfin conduit par pression d'air comprimé, aux trémies situées au-dessus des chaudières. Cette installation, réalisée par la « Société d'utilisation des combustibles », dessert 10 chaudières Babcock de 635 m², timbrées à 18 kg/cm², pourvues de surchauffeurs pour 375°C et d'économiseurs. Ces chaudières sont alimentées à l'eau distillée, le complément étant fourni par des appareils de distillation Prache et Bouillon, à compression de vapeur.

Le courant, produit à 3 000 V, est utilisé en grande partie à cette tension pour les besoins de la mine. Le reste est élevé à 15 000 ou 45 000 volts par un poste voisin de la salle des machines.

Voici quelques particularités de cette Centrale :

Les auxiliaires sont exclusivement électriques, et le procédé suivant est employé pour assurer néanmoins la continuité de leur alimentation en cas de déclenchement : les unités de l'usine sont divisées en deux groupes qui travaillent chacun sur un jeu de barres différent (accessoirement il en résulte une diminution de la puissance nécessaire aux disjoncteurs). En cas de manque de courant sur le jeu de barres

Digitized by Google

qui alimente les auxiliaires, un relai à minimum de tension fait passer ceux-ci, en une fraction de seconde, sur l'autre jeu de barres.

Le tableau (Société Industrielle des Téléphones) comporte quelques dispositifs de sécurité spéciaux.

Les sectionneurs y sont placés au-dessus des barres, de sorte qu'en cas d'amorçage d'un arc, celui-ci ne peut atteindre les barres.

Les couteaux de mise à la terre des lignes sont disposés de façon que leur commande puisse être cadenassée. Ainsi, l'équipe qui travaille sur la ligne, et qui est munie de la clef du cadenas, est assurée qu'ils ne seront pas ouverts sans son intervention.

Un dispositif de mise sous tension progressive sert à essayer et remettre en service les feeders à 15 000 et 45 000 V, après une interruption : on emploie à cet effet, un convertisseur de 1 250 kW qui comprend un moteur asynchrone synchronisé et un alternateur.

Des dispositifs de verrouillage (serrure électrique Gorez et Musy), évitent qu'on puisse ouvrir un sectionneur lorsque le disjoncteur correspondant est fermé, ou fermer ce sectionneur lorsque le disjoncteur est ouvert.

Fosse Thiers. — Nous avons ensuite visité les installations électriques de surface de la fosse Thiers qui, détruites par les Allemands, ont été équipées par des procédés modernes.

Le puits d'extraction, d'une profondeur de 600 mètres, est pourvu d'un treuil du système dit « Ward Léonard », comprenant un moteur à courant continu de 750 ch à 500 V, alimenté par un groupe convertisseur à moteur asynchrone (Jeumont).

Le puits d'aérage est muni d'un treuil à courant triphasé, commandé par engrenages à l'aide d'un moteur asynchrone de 250 ch (Société Alsacienne).

Les machines auxiliaires comprennent deux ventilateurs de 200 ch et un compresseur à piston actionné par moteur synchrone.

Le tout est commandé par un tableau établi dans un bâtiment spécial, et où des précautions minutieuses ont été prises pour assurer la continuité du service.

II° Compagnie de halage électrique.

Les péniches sont remorquées entre Béthune et Etrun, c'est-à-dire sur une longueur de 76 km, qui comprend les rivages des principales mines, par des tracteurs sur rails, d'un poids de 9,5 tonnes, susceptibles de donner un effort de 900 kg au crochet, à la

Digitized by Google

vitesse de 1 m/s qui a été reconnue comme la vitesse économique. Ces tracteurs sont construits par la Compagnie elle-même. M. JAMOUILLET, ingénieur Chef de service, nous a montré un châssis en construction. Les deux essieux moteurs sont accouplés par un engrenage que porte un arbre intermédiaire. L'un des essieux est attaqué par un moteur à courant continu à 500 V. Le tracteur peut en outre, par shuntage des inducteurs, marcher à la vitesse de 14 km/h pour les trajets haut-le-pied. Chaque tracteur s'avance jusqu'à la rencontre du tracteur suivant ou précédent, puis l'échange des bateaux se fait par un procédé très simple, et le tracteur revient sur ses pas. La section ainsi parcourue est d'environ 700 m.

III° Compagnie des mines de Dourges.

Fosse Mulot. — Les installations de cette fosse sont alimentées par un poste abaisseur 15 000/3 000 V, comprenant 4 transformateurs de 1 250 kVA. — Tous les moteurs de 50 ch et au-dessus sont alimentés directement sous 3 000 V ; deux transformateurs de 150 kVA fournissent le courant à 115/200 V, pour l'éclairage et les moteurs plus faibles.

L'extraction s'effectue, comme précédemment, par deux puits dont l'un sert de puits de retour d'air, et qui sont pourvus, l'un d'un treuil à câble plat à courant alternatif, l'autre d'un treuil à tambour bicylindroconique, avec commande par le dispositif « Ward Léonard ».

Le premier de ces treuils est commandé par un moteur de 430 ch à 375 t/mn, attaquant l'arbre des bobines par engrenages. La vitesse linéaire maximum du câble est 10 m/s.

Un levier unique de manœuvre permet :

La commande du démarreur (résistance liquide) ;

celle de l'inverseur ;

celle des deux freins de service ;

la marche à contre-courant.

Un dispositif automatique de mise en court-circuit du rotor permet, en outre, de descendre une charge en faisant travailler le moteur en génératrice asynchrone, et une résistance additionnelle peut donner une vitesse de 0 m, 12/s pour les visites.

Le treuil « Ward Léonard » est commandé par deux moteurs ayant leurs induits en porte à faux.

Le tambour bicylindroconique est divisé en deux parties déplaçables l'une par rapport à l'autre, ce qui permet, à l'aide d'un mécanisme à vis, le réglage facile des câbles.

Digitized by Google

Les deux moteurs sont alimentés par un convertisseur à deux génératrices. Ces moteurs et génératrices fonctionnant normalement en série, permettent encore la marche à demi-vitesse en cas d'accident à l'un des deux organes.

La ventilation des galeries est assurée par deux ventilateurs Rateau de 250 ch et l'air comprimé est fourni par 3 compresseurs Leflaive de 390 ch.

Enfin, tous les moteurs étant asynchrones, un compensateur synchrone de 1 000 kVA a été installé sur les barres à 3 000 V de façon à ramener le facteur de puissance à 0,9.

IV° Compagnie des mines de Courrières.

Centrale. — La Centrale des Mines de Courrières est prévue pour 80 000 kW et contient actuellement 5 turbo-alternateurs de 10 000 kW.

Les chaudières, du type Garbe, sont pourvues d'économiseurs et de réchauffeurs d'air. Elles sont munies de foyers à poussoirs Erith-Riley.

Les turbo-groupes ont été construits par la Société Alsacienne.

La condensation a lieu avec l'aide de réfrigérants Balcke. Une partie des auxiliaires sont à courant-continu ; ils sont alimentés par deux convertisseurs de 600 kW.

Le tableau est séparé de l'Usine proprement dite. La tension des alternateurs (3 000 V) est réglée par des régulateurs Thury. Elle est élevée à 15 000 V par des transformateurs qui reçoivent directement le courant des alternateurs, et l'énergie est envoyée à cette tension aux divers sièges.

Le réseau est d'ailleurs interconnecté avec les Compagnies voisines (Lens, Drocourt, Dourges, Liévin).

V° Compagnie des mines de Noeux.

Fosse n° 6. — Nous y avons retrouvé, comme dans la plupart des installations, un treuil « Ward Léonard » sur le puits principal, et un treuil triphasé à engrenages sur le puits de retour d'air.

Toutefois, une particularité de cette installation est que le convertisseur qui alimente le treuil à courant continu est pourvu d'un moteur *synchrone* de 600 kW (Compagnie Electro-Mécanique) et que ce moteur est pourvu d'un régulateur de puissance réactive qui, quelle que soit la charge, lui fait débiter constamment 180 kVA réactifs.

De même, tous les appareils auxiliaires : compresseurs, ventilateurs, etc... sont actionnés par moteurs synchrones, ce qui donne plus

Digitized by Google

de facilité pour l'attaque directe et permet de maintenir très voisin de l'unité, le facteur de puissance général. Le démarrage de ces moteurs s'effectue en asynchrone à l'aide d'autotransformateurs fournissant une tension réduite.

Centrale de Beuvry. — Cette Centrale, prévue pour une puissance finale de 70 000 kW, renferme actuellement 2 groupes de 6 000 kW, 2 groupes de 10 000 kW et 1 groupe de 16 000 kW avec poste élévateur à 15 000 et 45 000 V.

Toutefois, la tension primaire est de 5 000 V, au lieu de 3 000 comme dans la plupart des mines du Nord.

Cette Centrale présente ceci de particulier, que toute l'eau nécessaire est puisée dans des forages, la condensation étant, bien entendu, assurée avec le concours de réfrigérants.

A cet effet, 3 forages de 45 m de profondeur et 60 cm de diamètre au sommet, peuvent fournir chacun 100 m³ d'eau à l'heure.

Les premières chaudières (Kestner) sont pourvues de grilles-chaînes (Roubaix) et d'économiseurs (Green).

Des précautions spéciales ont été prises dans les appareils de manutention, étant donnée la nature particulière des combustibles à brûler, composés principalement de résidus de lavages très chargés en eau.

Les chaudières suivantes (du Temple et Stirling) sont chauffées au combustible pulvérisé.

Les tuyauteries sont pourvues de joints articulés Luc Denis.

Les turbo-alternateurs (Schneider et Cie) ont leurs pompes auxiliaires commandées électriquement, les appareils d'extraction d'air étant des éjecteurs à vapeur.

Le refroidissement de l'eau de condensation est assuré par 4 réfrigérants en ciment armé. L'eau chaude leur est amenée par une canalisation, partie aérienne, partie souterraine. L'eau refroidie retourne aux condenseurs par un canal souterrain.

VI° Compagnie des mines de Marles.

Fosse n° 6. — La fosse n° 6 des mines de Marles, comporte un treuil « Ward Léonard » avec tambour bicylindroconique (716 kW) muni de dispositifs de commande et de sécurité très complets (Compagnie Electro-Mécanique).

Nous avons également trouvé, au siège n° 6, un compresseur Ingersoll avec moteur synchrone, et un électrocompresseur centrifuge (Brown Boveri) à 7 850 t/mn, commandé par engrenages par un moteur asynchrone à 2 965 t/mn (1 200 kW).

Digitized by Google

Centrale de Choques. — La Centrale de Choques est pourvue de 2 unités de 6 000 kW et une de 12 000 kW (Société Alsacienne de Constructions Mécaniques).

L'eau de condensation, fournie par la Clarence, étant boueuse, passe dans des bassins de décantation. Deux forages peuvent fournir un appoint, et un réfrigérant Balke complète l'installation.

Les chaudières sont chauffées, partie par des grilles mécaniques, partie par des appareils à combustible pulvérisé, les uns du type « Rex » les autres de la « Société Anonyme des Appareils de Manutention et Fours Stein ».

Les pompes de circulation et d'extraction des condensateurs sont commandées par turbines à vapeur. L'air est extrait par des éjecteurs S. C. A. M.

Les alternateurs sont à encoches de fuite, le courant instantané de court-circuit ne dépassant pas 6 fois le courant normal pour la machine de 6 000 kW.

Conclusions.

La régulation de la tension a lieu par des régulateurs Thury.

Il ne nous a été possible, dans cet aperçu, que d'esquisser rapidement les grandes lignes de ces intéressantes installations.

Il s'en dégage notamment un souci de la sécurité, qui semblerait devoir exclure toute chance d'accidents : limiteurs de vitesse, limiteurs d'accélération, frein de service, frein de sécurité, se rencontrent sur tous les treuils d'extraction, indépendamment de dispositions de détail ayant pour but de prévoir tout ce qui peut constituer un aléa, et tout ceci indépendamment d'une surveillance active, de consignes rigoureuses, de précautions dont on trouve la trace à chaque pas.

Les Centrales que nous avons visitées sont remarquablement conçues : matériel de premier ordre, dispositions judicieuses, précautions de toutes sortes prises contre les arrêts possibles.

Sans doute ne répondent-elles plus aux données les plus récentes : on n'y trouve ni prélèvements de vapeur, ni hautes pressions, rarement des réchauffeurs d'air, mais il faut se souvenir que la plupart de ces usines ont été étudiées avant la fin de la guerre, et que dans ces quelques années, l'industrie a marché à grands pas. On peut dire qu'elles représentent les dispositions les plus parfaites qu'on pouvait adopter lorsqu'elles ont été conçues.

Par contre, on trouverait difficilement ailleurs une science plus

Digitized by Google

approfondie de la combustion des charbons de qualité inférieure, et des applications plus raisonnées des divers types de foyers modernes. Au cours des réceptions cordiales et somptueuses qu'ils nous ont offertes, MM. les Directeurs généraux des Compagnies minières ont insisté sur la transformation que l'emploi de l'électricité a apportée à l'exploitation des mines. Il nous a été agréable d'entendre ces hommes, qui font autorité dans le monde minier, émettre cette appréciation.

Peut-être ont-ils négligé de nous rappeler que c'est grâce à leur initiative que l'électrification s'est ainsi généralisée.

Quoi qu'il en soit, ceux de nos collègues qui ont pris part à la réalisation de ces belles installations doivent être fiers du résultat obtenu.

Digitized by Google

TRAVAUX DES SECTIONS [1]

SOMMAIRE

1re Section. — Fonctionnement en régime amorcé d'une génératrice asynchrone isolée du réseau, par M. Létrillart, p. 807.

3e Section. — Les fours à induction (suite), par M. Bunet, p. 807 à 824. - Facteur de puissance des fours à induction, par M. Mathieu, p. 822.

4e Section. — La récupération en traction électrique, par MM. Guéry et Della Riccia, p. 830.

5e Section. — Les nouvelles applications des cellules photo-électriques basées sur l'emploi d'un éclairage périodique; applications aux instruments de musique, par M. Toulon, p. 830.

1re SECTION. — PRODUCTION

Présidence de M. P. Girault.

Séance du 13 juin 1927. — *Fonctionnement en régime amorcé d'une génératrice asynchrone isolée du réseau.* — M. Létrillart résume la communication que M. Langlois présentera sur cette question au cours de la prochaine semaine de discussion d'octobre (Voir Bulletin de la Société de septembre 1927).

3e SECTION. — ELECTROCHIMIE. — ÉLECTROMÉTALLURGIE. PILES. — ACCUMULATEURS.

Présidence de M. Chaumat.

Séance du 30 avril 1927. — *Les fours à induction.*

(Four de basse fréquence, suite) par M. Bunet.

Réponse à l'objection de M. Levasseur. — Si on suppose un four *avec les deux circuits de même hauteur et rapprochés*, on peut appliquer la formule de tg φ où cette hauteur disparaît.

Mais si ces circuits n'ont pas même hauteur, ce qui arrive tou-

(1) Tout membre de la Société française des Electriciens peut, en adressant une demande au Délégué général, 14, rue de Staël, être convoqué aux séances des sections.

Digitized by Google

jours quand on diminue la hauteur de métal fondu dans la rigole, il faut revenir à $\operatorname{tg}\varphi = \frac{l\omega}{r}$.

Prenons cette rigole pleine, puis réduisons la hauteur de moitié par exemple : 1° Si le métal fondu reste identique, *la puissance baisse de moitié*, la résistance double ; l augmente, mais les fuites magnétiques par dispersion entre les deux circuits, ne doublent manifestement pas. Donc $\operatorname{tg}\varphi$ diminue et $\cos\varphi$ augmente.

2° Si le métal fondu a varié de qualité, il peut en être autrement ; ainsi il peut avoir diminué de résistivité ; alors on diminue la hauteur pour garder *puissance constante*. Dans ce cas r ne varie pas, l augmente; donc $\operatorname{tg}\varphi$ augmente et $\cos\varphi$ diminue.

Dans le premier cas, en portant $\cos\varphi$ en ordonnées et la hauteur en abscisses, on a une courbe descendant quand les abscisses croissent, et le contraire dans le second.

Les fours à induction de fréquence élevée, ou fours sans fer, se composent d'un circuit primaire, solénoïde mince, presque toujours à une seule couche, afin de réduire au minimum les courants parasites induits dans ce primaire même.

A l'intérieur est un secondaire dans lequel se développent les courants induits. Deux cas principaux se présentent :

1° on chauffe des matières isolantes ou peu conductrices dans un creuset conducteur, comme du graphite, pour des poudres ; on peut avoir aussi un récipient métallique pour des liquides ;

2° on chauffe des matières conductrices dans un creuset réfractaire isolant ; comme variante, ce creuset peut être plus ou moins conducteur ; on peut chauffer du cuivre dans un creuset de graphite.

A) Chauffage d'une paroi mince par un solénoïde mince, contenant un corps isolant. En négligeant le fond du creuset, il constitue seulement une spire fermée de rayon moyen X et de surface moyenne $\pi X^2 = S_2$ (on tiendrait compte du fond s'il était important en l'assimilant à une masse pleine selon le deuxième cas).

Section moyenne primaire S_1 ; nombre de spires n ; hauteur de la spire secondaire A qui est voisine de la hauteur de l'enroulement primaire.

Le champ d'un solénoïde est de la forme $\frac{4\pi nI}{l}$; formule connue ; l est la longueur seule du solénoïde, ce qui suppose la réluctance

Digitized by Google

extérieure nulle par accroissement infini de la section. Si le solénoïde n'est pas très long, il y a une longueur fictive un peu plus longue que l à introduire ; on assimile alors le circuit magnétique à une longueur un peu plus longue que le solénoïde, de section constante, le reste étant de section infinie. Appelons A_m cette longueur. On a

$$a = \frac{A}{A_m} \leqslant 1.$$

Posons aussi

$$s = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \geqslant 1.$$

1° On peut traiter le problème par les équations connues

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 = 0,$$

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 - u_1 = 0,$$

où R_1 et R_2 sont les résistances des circuits primaire et secondaire, L_1 et L_2 les coefficients totaux de self induction, M celui de mutuelle induction.

$$L_1 = 4\pi \frac{n^2}{A_m} S_1 ; \qquad L_2 = 4\pi \frac{1}{A_m} S_2 ; \qquad M = 4\pi \frac{n}{A_m} S_2.$$

Il ne reste plus qu'à continuer le calcul.

On peut négliger R_1 à condition d'effectuer une correction finale ;

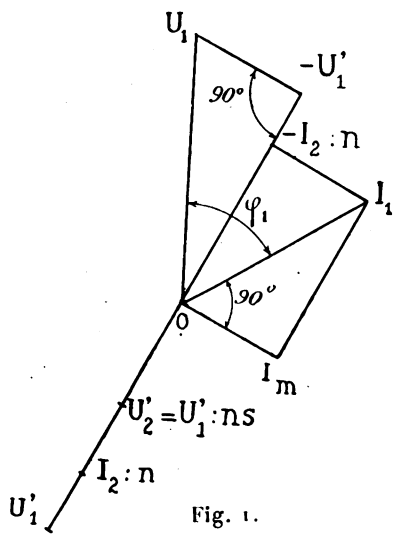


Fig. 1.

on peut le faire sauf quand cette perte primaire est très considérable ; mais cela n'a lieu que dans de mauvais fours ou dans des fours mal

Digitized by Google

employés, amenant à un mauvais rendement et à la nécessité de beaucoup d'eau de circulation emmenant beaucoup de chaleur du four.

2° On peut faire le diagramme figure 1 :

OU_1 tension appliquée au four;

— OU'_1 tension restant après correction de la chute due à la dispersion entre les circuits provenant du courant de charge.

+ OU'_1 force contre-électromotrice primaire;

+ OU'_1 force contre-électromotrice secondaire.

Ces deux *f. c. e. m.* sont créées par le même flux, la seconde n'utilisant que $\frac{I}{s}$, avec 1 spire au lieu de n.

$I_2 : n$, courant secondaire ramené au primaire;

I_m courant magnétisant circulant dans le primaire pour créer le flux donnant les forces *c. e. m.* ci-dessus.

I_1 courant primaire total;

φ_1 déphasage primaire.

On peut calculer toutes les quantités que l'on désire au moyen de la géométrie et de la trigonométrie.

3° On peut traduire ce même diagramme en imaginaires.

Ce sera :

$$-U'_1 = U_1 + j\frac{4\pi}{A_m} n^2(S_1 - S_2)(I_2 : n)\omega,$$

$$I_m = j\frac{U'_1}{\frac{4\pi}{A_m} n^2 S_1 \omega}$$

$$I_2 = \frac{U'_1}{ns R_2}.$$

Les calculs faits par 1°, 2°, 3° conduisent à ces résultats :

La puissance transformée en chaleur dans le secondaire est $P = R_2 I_2^2$.

D'autre part, ces résultats assez compliqués et peu maniables, se simplifient si comme on le doit, on fait fonctionner le four à une fréquence telle que le facteur de puissance soit maximum ou près d'être maximum.

Dans ces conditions, en exprimant tout en système électro-magnétique pratique nous avons :

Digitized by Google

randeurs	Formules générales	Pour cos φ_1 maximum
P	$\left(\frac{U_1}{n}\right)^2 \frac{R_2}{R_2^2 + 6{,}4\,\frac{X^4}{A_m^2}(s-1)^2 f^2 .10^{-14}}$	$\left(\frac{U_1}{n}\right)^2 \frac{1}{R_2}\,\frac{1}{s(2s-1)}$
cos φ_1	$\frac{1}{4}\frac{X^2}{A_m} s \frac{1}{R_2} f .10^{-6} \sqrt{\frac{1}{\left(s^2+6{,}4\frac{X^4}{A_m^2}(s-1)^2\frac{1}{R_2^2}f^2.10^{-14}\right)\left(s^2+6{,}4\frac{X^2}{A_m^2}s^2\frac{1}{R_2^2}f^2.10^{-14}\right)}}$	$\frac{1}{2(2s-1)}$
tg φ_1	$\frac{1}{4} s \frac{R_2 A_m}{X^2 f} 10^6 + (s-1)\frac{X^2 f}{R^2 A_m} 10^{-6}$	$2\sqrt{s(s-1)}$
I_1	$\frac{U_1}{\rho_1}$	$\frac{U_1}{n^2 R_2 s}$
ρ_1	$\frac{1}{4} n^2 \frac{X^2}{A_m} s f .10^{-6} \sqrt{\frac{s^2+6{,}4\frac{X^2}{A_m^2}(s-1)^2\frac{1}{R_2^2}f^2.10^{-14}}{s^2+6{,}4\frac{X^2}{A_m^2}s^2\frac{1}{R_2^2}f^2.10^{-14}}}$	$n^2 R_2 s$
f	quelconque	$\frac{R_2 A_m}{8\pi^2 s_2}\sqrt{\frac{s}{s-1}}.10^9$
Rapport $\frac{U_1}{n}$ s tensions	$U_2 \times \ldots\ldots$	$U_2\sqrt{s(2s-1)}$

Les formules, en se tenant à la fréquence f_M indiquée qui rend cos φ_1 maximum, deviennent ainsi très simples. Cette fréquence f_M dépend des dimensions du four, A_m, S_2, s, puis de la nature des parois du creuset avec R_2.

Si on veut varier R_2, s'il change avec la température, il faut voir de combien varie cos φ_1 quand la fréquence oscille autour de f_M.

Si f_M est multiplié ou divisé par $\sqrt{2}$ $= \cos\varphi_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(3s-2)(3s-1)}}$

f_M » » $2 = \cos\varphi_1 = \frac{2}{\sqrt{(5s-4)(5s-1)}}$

f_M » » $3 = \cos\varphi_1 = \frac{3}{\sqrt{(10s-9)(10s-1)}}$

et ainsi de suite selon la même loi.

La première de ces formules permettra une variation de fréquence de 1 à 2, la seconde de 1 à 4, la troisième de 1 à 9, toujours avec f_M au milieu.

1er Exemple. — Petit four P = 10 kW ;

Diamètre moyen du creuset 20 cm $S_2 = 314$;

Diamètre moyen primaire 30 cm.

Ceci donne immédiatement le facteur de puissance le plus grand qu'on puisse obtenir. On a $s = \left(\frac{30}{20}\right)^2 = 2{,}25$.

Digitized by Google

Donc $(\cos \varphi)_M = \frac{1}{3.5} = 0{,}285$, pour une fréquence à déterminer par la formule donnée ci-dessus.

Si on prend une fréquence $\sqrt{2}$ fois plus grande ou plus petite, on ne tombe qu'à 0,270.

Si on prend une fréquence 2 fois plus grande ou plus petite on a 0,232 ;

Si on prend une fréquence 3 fois plus grande ou plus petite on a 0,177.

Il faut déterminer le creuset $\Lambda = 30$ cm ; épaisseur 1 cm en charbon de $2\,000.10^{-6}$ ohm cm d'où $R_2 = 4{,}2.10^{-3}$ ohm.

Gardons $\Lambda_M = 30$; la fréquence à adopter pour cos φ max. est :

$$f_M = 6\,700 \text{ p : s.}$$

Le courant secondaire $\sqrt{\frac{P}{R_2}}$ est 1 540 A et la tension secondaire 6,5 V.

La tension primaire par spire est ainsi 18,2 V.

S'il y a 50 spires, il faut 910 V avec un courant de 39 A.

Tout est ainsi déterminé :

Pour le primaire, prenons du tube de 5 mm de diamètre et d'épaisseur plus forte que la peau donnée par l'effet Kelvin déterminé par la formule ordinaire $\frac{5\,030}{\sqrt{f\gamma}}$ cm où γ est la conductivité. Ici c'est 0,08. La résistance primaire est ainsi 0,075 ohm, ce qui donne seulement 3 V de chute et une perte de 115 W ou 1,15 pour cent.

2e *Exemple*. — Four moyen 100 kW.

Diamètre moyen du creuset 50 cm $S_2 = 1963$;

Diamètre moyen du primaire 70 cm $s = \left(\frac{70}{50}\right)^2 = 1{,}96$;

Meilleur cos φ_1 possible $\frac{1}{2.92} = 0{,}342$.

Avec fréquence $\sqrt{2}$ fois plus grande ou plus petite 0,312,

Avec fréquence 2 fois plus grande ou plus petite 0,280,

Avec fréquence 3 fois plus grande ou plus petite 0,214.

Soit $\Lambda = 50$ cm; $\Lambda_m = 65$ cm; creuset de 5 cm d'épaisseur en charbon de $2\,000{,}10^{-6}$ de résistivité $R_2 = 1{,}25.10^{-3}$ ohm.

Meilleure fréquence $f_M = 740$ p : s.

Courant secondaire 8 950 A; tension secondaire 11,2 V.

Tension primaire par spire 26,7; avec 30 spires on aura 800 V et 363 A.

Digitized by Google

On voit facilement qu'on peut maintenir la perte primaire à l'ordre de 2 pour cent.

3e *Exemple.* — Grand four $P = 1\,000$ kW.

Diamètre moyen du creuset 140 cm $S_2 = 15\,400$,

Diamètre moyen du primaire 165 cm $s = \left(\frac{165}{140}\right)^2 = 1{,}39$,

Meilleur facteur de puissance $\frac{1}{1{,}78} = 0{,}562$,

Si la fréquence s'écarte de $\sqrt{2}$ fois ou $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 0,532;

Si la fréquence s'écarte de 2 fois ou $\frac{1}{2}$, 0,477;

Si la fréquence s'écarte de 3 fois ou $\frac{1}{3}$, 0,377.

Soit $A = 100$ $A_m = 130$; parois de charbon de 8 cm d'épaisseur $R_2 = 1{,}1.10^{-3}$.

Meilleure fréquence 219 p : s.

Courant secondaire 30 200 A; tension secondaire 33,1.

Tension primaire par spire 52,2.

Avec 50 spires il faudrait 2 610 V, 684 A primaires.

Avec 10 spires il faudrait 522 V, 3 420 A primaires.

La perte primaire resterait faible.

B) Chauffage de liquides. — On aurait avec les dimensions ci-dessus les mêmes facteurs de puissance qui ne dépendent que du rapport des sections. On pourrait amener la résistance à ce qu'on voudrait avec des parois suffisamment peu résistantes, amenant les meilleures fréquences de fonctionnement aux fréquences usuelles pour un appareil un peu grand.

Condensateurs. — Généralement on aurait intérêt à conserver $\cos\varphi = 1$ à l'alternateur, en ajoutant des condensateurs dont la capacité doit être d'autant plus réduite que la fréquence est plus élevée.

Ainsi pour le four de 100 kW avec $\cos\varphi = 0{,}342$ ou $\sin\varphi = 0{,}94$, il faut $100 \times \frac{0{,}94}{0{,}342} = 275$ kWA de condensateurs.

Si on ramène à la fréquence 50 p : s par proportionnalité (ce qui n'est pas tout à fait exact à cause des pertes diélectriques), il faudrait

$$270 \times \frac{50}{740} = 18{,}5 \text{ kVA}$$

c'est-à-dire le même condensateur qui amènerait à $\cos\varphi = 1$ un moteur de 25 kW, $\cos\varphi = 0{,}8$ environ.

Digitized by Google

Remarque. — Les exemples ci-dessus sont donnés pour indiquer comment se fait le calcul. Il n'y a pas de dimensions déterminées d'un four de puissance déterminée, ce calcul étant fait *a priori* par l'électricien. On doit partir des besoins du chimiste ou du métallurgiste demandant que l'on envoie dans un récipient donné, de grandeur et qualités données, une puissance donnée en tenant compte de plus des nécessités du travail à effectuer, fixant notamment les distances raisonnables entre circuits.

M. MATHIEU signale qu'il est possible d'aborder le problème du facteur de puissance des fours à induction, par une méthode parfois employée pour les transformateurs, et qui permet d'expliquer de façon assez précise la diminution de facteur de puissance qui se manifeste lorsqu'on accroît l'importance du chargement.

M. SUHR, Ingénieur en Chef du Service des Recherches à la Compagnie des Produits Chimiques d'Alais Froges et Camargue, présente une communication sur l'*Almelec*.

Répondant à diverses questions, il fait connaître que le prix du fil d'almelec est du même ordre de grandeur que le prix du fil d'aluminium; et que l'almelec peut parfaitement se prêter à la fabrication des feuillards des lignes B. T. sandwichées pour fours électriques.

SÉANCE DU 28 MAI 1927. — M. BUNET continue sa communication sur *les fours à induction* (1).

Abordons le cas du chauffage d'une masse pleine conductrice. Il a été traité d'abord par NORTHRUP d'une manière inexacte. Cet auteur part de ce qu'un solénoïde de self-inductance L, parcouru par un courant I, a accumulé $\frac{1}{2}$ LI^2. Si le courant est alternatif, cette énergie est successivement accumulée, puis restituée : c'est l'ensemble de ces accumulations et restitutions qui constitue le phénomène du passage de courant alternatif dans une self-inductance. NORTHRUP place dans le solénoïde une masse métallique pleine ; il admet qu'à haute fréquence l'accumulation $\frac{1}{2}$ LI^2 disparaît, cette énergie se dissipant en chaleur dans la masse; puis pendant l'autre moitié du temps il n'y a plus restitution tout simplement. Cette hypothèse n'est pas exacte.

(1) Voir *Bulletin*.

Digitized by Google

De plus NORTHRUP arrive lui-même à un ensemble dont le facteur de puissance est faible ; la self-inductance et l'accumulation de forme $\frac{1}{2}$ LI² restituable ne disparaissent donc pas.

M. RIBAUD a présenté une théorie du four à haute fréquence qui nous paraît manquer de rigueur. Elle ne se présente pas sous une forme bien maniable en pratique.

Avant de traiter le cas du four lui-même il faut bien mettre en évidence la résistance apparente, l'inductance d'une masse pleine placée dans le solénoïde et la quantité de chaleur dissipée. En traitant ce problème, en partant comme on le fait ordinairement, nous appellerons X le rayon de la masse dont la résistivité est ρ et la conductivité γ ; donc $\rho\gamma = 1$. La densité de courant est D au point X, et nous supposons connue la densité superficielle D_X. Les autres notations sont celles de la dernière communication : A pour la hauteur du cylindre notamment et A_m pour la longueur des lignes de force. Entre les deux cercles distants de dx, le champ varie d'une face à l'autre de :

$$d\mathcal{H} = \frac{4\pi}{10} D \frac{A}{A_m} dx = \frac{4\pi}{10} D a dx \text{ gauss.}$$

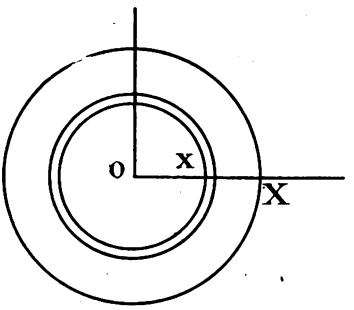


Fig. 2.

Le flux dans cet intervalle est :

$$d\Phi = \mu\mathcal{H}.2\pi x.dx.$$

La différence de tension entre les deux circonférences distantes de dx est :

$$-dU = -j\omega d\Phi = -j\omega\mu\mathcal{H}2\pi x dx.10^{-8} \text{ volt.}$$

La différence de densité de courant est :

$$dD = \frac{dU}{2\pi x}\gamma = s\omega\mu\mathcal{H}\gamma dx.10^{-8} \text{ amp : cm}^2.$$

En combinant ces équations on arrive à :

$$\frac{d^2D}{dx^2} = j2c^2D,$$

Digitized by Google

avec

$$c = 2\pi\sqrt{af\mu\gamma.10^{-9}},$$

si $\mu = 1$ $$c = 2\pi\sqrt{af.\gamma.10^{-9}}.$$

L'intégration donne :

$$D = D_X \frac{(e^{cx} + e^{-cx})\cos cx + j(e^{cx} - e^{-cx})\sin cx}{(e^{cX} + e^{-cX})\cos cX + j(e^{cX} - e^{-cX})\sin cX},$$

dont la valeur absolue est :

$$|D| = D_X \sqrt{\frac{e^{2cx} + e^{-2cx} + 2\cos 2cx}{e^{2cX} + e^{-2cX} + 2\cos 2cX}}$$

La chaleur dégagée est :

$$P = 2\pi\rho A D_X^2 \frac{e^{2cX}\left(\frac{X}{2c} - \frac{1}{4c^2}\right) - e^{-2cX}\left(\frac{X}{2c} + \frac{1}{4c^2}\right) + \frac{X}{c}\sin 2cX + \frac{1}{2c^2}\cos 2cX}{e^{2cX} + e^{-2cX} + 2\cos 2cX}.$$

Cas *a*). — On calcule $c = 2\pi\sqrt{af\gamma.10^{-9}}$; on multiplie par X.

Si cX est assez grand, dépassant 4 ou 5, e^{-2cX}, les sinus et les cosinus deviennent négligeables devant e^{2cX}. Les formules se simplifient beaucoup

$$P = \frac{400AU_X^2}{X\sqrt{a}}\sqrt{\frac{\gamma}{f}} \text{ watts}$$

où U_X est la tension qui créerait, en l'appliquant à la périphérie la densité de courant périphérique,

$$D_X = \frac{U_X}{\rho 2\pi X}.$$

La densité de courant moyenne, définie par

$$D_m = \frac{1}{X}\int_0^X D dx$$

s'écrira simplement :

$$D_m = D_X \frac{1}{cX(1+j)}.$$

Cela correspond à une impédance totale et moyenne

$$Z = \frac{2\pi cX\rho}{A}(1+j)$$

se composant d'une résistance $\frac{2\pi cX\rho}{A}$ $\left(\text{ou une épaisseur de peau } \frac{1}{c}\right)$ et d'une réactance égale, avec déphasage de $\frac{\pi}{4}$. Ce sont les formules ordinaires de l'effet Kelvin, avec addition de a caractérisant la réluctance du circuit magnétique.

Cas *b*). — Quand $cX < 0{,}1$ environ on a $D_m = D_0 = D_X$; la puis-

Digitized by Google

sance est : $$P = AU_X^2 \frac{1}{4\pi\rho}.$$

Cas *c*). — Quand $cX > 0{,}1$, il faut employer la formule de P complète : $cX < 4$. On a une résistance qu'on peut qualifier de peau épaisse, avec une réactance plus faible que la résistance.

Calcul du four. — Nous suivrons la même marche que celle que nous avons employée pour le creuset mince quand nous serons dans le *cas a*. Il faut simplement changer la seconde équation différentielle qui devient :

$$\left(L_2 + \frac{R_2}{\omega}\right)\frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt} + R_2 i_2 = 0.$$

Nous négligerons encore la résistance primaire, quitte à faire une correction à la fin.

Quant au diagramme, il faudra faire un angle de 45° entre U_2 et I_2 : il devient ainsi en remplaçant U_2 par U_X :

En poursuivant le calcul de la même manière nous aurons les formules :

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = (2s-1) + cX(s-1) + \frac{2s}{cX},$$

$$U_1' = U_X n s,$$

$$U_1 = U_1'\sqrt{1 + \left(\frac{s-1}{s}\right)^2\frac{c^2X^2}{2} + \left(\frac{s-1}{s}\right)cX}.$$

On partira de la puissance requise

$$P = \frac{400AU_X^2}{X\sqrt{a}}\sqrt{\frac{\gamma}{f}}$$

qui donne U_X nécessaire ; de là U_1' ; puis U_1 et $\operatorname{tg}\varphi_1$. Tout est ainsi déterminé.

Rappelons que *s* est le rapport de la section moyenne du solénoïde primaire à la section totale du secondaire.

En fonction de la fréquence, $\operatorname{tg}\varphi_1$ passe par un minimum ; donc $\cos\varphi_1$ passe par un maximum. Contrairement au cas du creuset mince, on arrive en général pour $\cos\varphi_1$ maximum à une fréquence trop basse pour que les formules s'appliquent ou qu'on puisse l'utiliser pratiquement.

Dans le *cas b* de cX petit on arriverait à

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = 2\left(s - \frac{1}{2}\right)c^2X^2 + \frac{2s}{c^2X^2},$$

$$U_1' = U_X n s,$$

$$U_1 = U_1'\sqrt{1 + c^4X^4\left(\frac{s-\frac{1}{2}}{s}\right)^2}.$$

Digitized by Google

On partira de la puissance requise

$$P = AU_X^2 \frac{1}{4\pi\rho},$$

qui donne U_X nécessaire, etc...

Dans le *cas c* intermédiaire, il faut partir de la formule complète

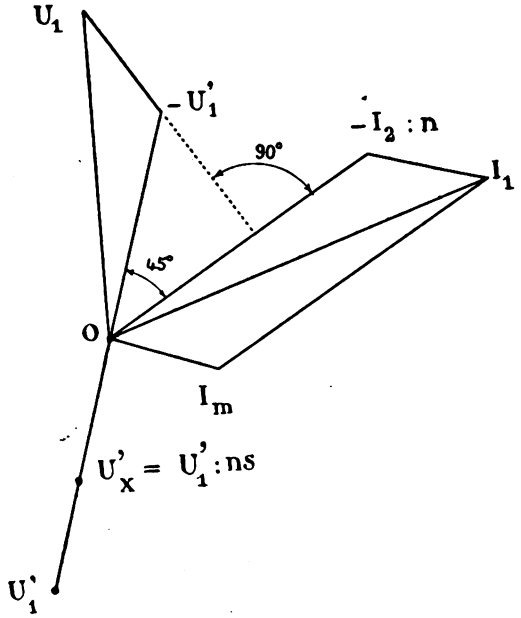


Fig. 3.

de la puissance, qui donne toujours U_X nécessaire ; on appliquera les formules, où *pqt* sont des quantités auxiliaires :

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = pq\left(2s - \frac{1}{q}\right) + \frac{q}{qt}\left(s - \frac{1}{q}\right)cX + qt\left(1 + p^2\right)\frac{2s}{cX},$$

$$U_1' = U_X ns,$$

$$U_1 = U_1'\sqrt{1 + \frac{1}{2t^2(1+p^2)}\left(\frac{s - \frac{1}{q}}{s}\right)^2\frac{c^2X^2}{2} + \frac{p}{(1+p^2)t}\left(\frac{s - \frac{1}{q}}{s}\right)cX}.$$

Pour le calcul de P. U_1, tg φ_1, on pourra se servir du tableau :

cX	e^{-2cX}	e^{2cX}	sin $2cX$	cos $2cX$	p	q	t
> 5					1	1	0,5
5	22000	0,000045	$-0,545$	$-0,839$	1	1	0,5
2,5	148	0,0067	$-0,959$	$+0,283$	1	1	0,5
1	7,39	0,135	$+0,909$	$-0,419$	0,6	1,6	0,55
0,5	2,72	0,368	$+0,842$	$+0,538$	0,17	1,8	1
0,25	1,65	0,607	$+0,479$	$+0,878$	0,042	1,9	2
0,05	1,1	0,905	$+0,1$	$+0,995$	0	2	10
$< 0,05$	$1+2cX$	$1-2cX$	$2cX$	1	0	2	$\frac{1}{2cX}$

ou des courbes qui le traduisent.

Digitized by Google

VALEURS NUMÉRIQUES. — 1° Corps très conducteurs froids. Ex. Cuivre à 60°C,

$$\rho = 2.10^{-6},$$

si $a = 0{,}8, \qquad c^2 = 16f.10^{-3},$

$$f = 500, \qquad c = 2{,}8$$

on est dans le cas *a*) à partir de moins de 2 cm de rayon ;

$$f = 10\,000, \qquad c = 13$$

on est dans le cas *a*) à partir de moins de 1/2 cm de rayon.

2° Corps métalliques froids ou chauds de $\rho = 80.10^{-6}$,

$$f = 500, \qquad c = 0{,}45$$

avec un rayon de $>$ 10 cm, on est dans le cas *a*), avec un rayon de $>$ 5 cm, on est dans le cas *c*) ;

$$f = 10\,000, \qquad c = 2$$

avec un rayon de $>$ 2 cm, on est dans le cas *a*), avec un rayon de $>$ 1 cm, on est dans le cas *c*).

3° Graphite et corps analogues de $\rho = 800.10^{-6}$,

$$f = 500, \qquad c = 0{,}14$$

avec un rayon de $>$ 30 cm, on est dans le cas *a*), entre 30 et 1 cm, on est dans le cas *c*) ;

$$f = 10\,000, \qquad c = 0{,}6$$

avec un rayon de $>$ 6 cm, on est dans le cas *a*).

4° Poudres peu conductrices de $\rho = 8.10^{-2}$,

$$f = 500, \qquad c = 0{,}014$$

avec un rayon de quelques centimètres on est dans le cas *c*) ou dans le cas *b*).

REMARQUE. — Les équations sont mises sous forme telle qu'il n'y a à déterminer aucun coefficient d'inductance, ni aucune quantité autre que les dimensions linéaires de l'appareil, la fréquence et la résistivité de la matière chauffée. On ne peut donc résoudre la question plus simplement.

Applications. — 1° On veut fondre du cuivre, problème le plus difficile, car sa faible résistivité impose de basses tensions, donc de petits flux, puis des ampères-tours primaires élevés. Le facteur de puissance sera donc faible.

A froid $\rho = 2.10^{-6} \qquad \gamma = 5.10^{5}$

à 1 200° C $\rho = 20.10^{-6} \qquad \gamma = 5.10^{4}$.

On veut P = 50 kW ; volume 15 dm³.

Digitized by Google

Le croquis répond à la question et montre le creuset réfractaire contenant le cuivre. Autour est le primaire qui a aussi à peu près 50 cm de hauteur de telle sorte que $A_m = 60$ cm ou $a = 0{,}833$. $s = 2{,}25$; $n = 50$ spires primaires ; nos formules donnent avec cX toujours > 5.

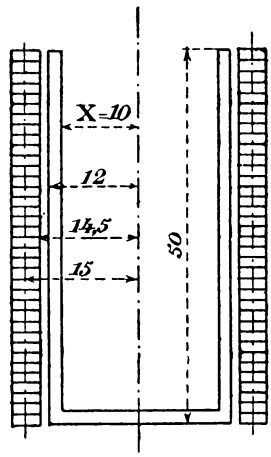


Fig. 4.

Fréquence	Alimentation du primaire (à froid)			Alimentation du primaire (à chaud)		
	U_1	I_1	cos φ_1	U_1	I_1	cos φ_1
250	690	2060	0,035	475	1290	0,082
500	1150	1720	0,026	735	1050	0,065
750	1525	1540	0,021	965	920	0,056
1 000	1900	1450	0,018	1170	850	0,05
2 000	3170	1200	0,013	1890	700	0,038
4 000	5200	1010	0,01	3100	580	0,028
10 000	10100	810	0,006	6000	450	0,018

On voit qu'il est extrêmement difficile de chauffer le cuivre froid : le facteur de puissance est trop bas. En pratique, ce cas est sans intérêt car on charge ordinairement le métal fondu pour commencer. Même à chaud, on a un facteur de puissance faible et on serait amené à marcher à des fréquences assez basses malgré la difficulté des forts courants primaires ; on doit considérer cependant que le prix des condensateurs ramenant cos φ vers 1 diminue quand la fréquence augmente.

En choisissant d'autres dimensions et surtout en resserrant le pri-

Digitized by Google

maire et le secondaire, on augmenterait le facteur de puissance, mais il resterait vers 0,1.

On voit facilement qu'à la fréquence 1 000 en tenant compte de l'effet Kelvin, on logerait dans l'espace indiqué un enroulement primaire où la perte Joule serait 5 à 6 kW, soit vers 10 pour cent de la puissance absorbée.

2° On veut chauffer un alliage ayant $\rho = 300.10^{-6}$ à chaud, en appliquant 200 kW sur un creuset de $X = 30$ cm ; $A = 80$ cm ; $A_m = 100$; $a = 0,8$; rayon moyen primaire 38 cm

$$s = \left(\frac{38}{30}\right)^2 = 1,6 ; \qquad n = 50.$$

On aura toujours sur notre tableau c $X < \varphi$ donc cas a encore.

Fréquence	U_1	I_1	$\cos \varphi_1$
250	1160	1020	0,17
500	1720	810	0,14
1000	2620	630	0,12
2000	4100	530	0,09
4000	6600	430	0,07
10000	12500	340	0,05

Le facteur de puissance est meilleur, et on peut avoir, avec une étude plus serrée, de 0,15 à 0,20, un peu au-dessus ou au-dessous de $f = 500$, ce qui est d'accord avec les fours construits en Amérique et les quelques résultats publiés.

On loge facilement à la fréquence 1 000 un primaire où la perte n'est que 3 pour cent.

3° Dans un petit creuset de $X = 7,5$ cm de rayon et vers 30 cm de hauteur on veut dépenser 20 kW ; $s = 3$ environ.

$\rho = 1\,000.10^{-6}$, $cX = 1$ environ cas c $U_1 = 10,7n$, $\cos \varphi_1 = 0,088$

$\rho = 300.10^{-6}$, $cX = 1,9$ cas c,

le cas a s'appliquant presque

$$U_1 = 10n, \qquad \cos \varphi_1 = 0,097.$$

On pourra donc à peu près avec les mêmes résultats traiter deux corps de résistivités assez différentes.

Remarques. — Le cas b s'applique rarement. Il correspond en général, sauf pour de tout petits creusets, à une puissance relativement faible

Digitized by Google

pour le volume de matière. Dans ce cas, il vaut mieux souvent recourir à un creuset conducteur. Si on est maître de la fréquence, on pourra l'élever assez pour que cX ait une valeur convenable et entrer dans les cas *a* ou *c*.

Voir *suite et fin*, p. 824.

M. MATHIEU présente quelques *remarques sur le facteur de puissance des fours à induction*. — REMARQUE I. — M. LEVASSEUR a signalé que le facteur de puissance des fours Kjellin décroît, au moins à partir d'un certain moment, quand on accroît leur charge.

M. BUNET a montré comment on peut raisonner pour déterminer l'allure des variations du facteur de puissance en fonction de la charge, et cela en étudiant la formule :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{l\omega}{r}.$$

La remarque de M. LEVASSEUR peut se rapprocher d'un fait expérimental constaté sur les transformateurs de puissance à plusieurs rapports, et, en partant de cette analogie on peut trouver, au moins dans certains cas, l'allure des variations du facteur de puissance en fonction de la charge.

Dans les transformateurs à plusieurs rapports et dont les prises sont placées au milieu du bobinage, il y a un rapport pour lequel il existe un vide dans les ampères-tours haute tension (cas du minimum de spires à la haute tension). La chute inductive d'un tel système est *tantôt plus grande*, *tantôt plus petite* que celle que l'on peut calculer en supposant les ampères-tours haute tension uniformément répartis sur toute la hauteur du bobinage.

On constate donc des cas où *le vide au milieu du bobinage conduit* à une chute inductive moins élevée, et, par conséquent *à un facteur de puissance plus élevé que si le bobinage était uniformément réparti.*

Pour prévoir les vraies valeurs des chutes inductives dans les bobinages non uniformes, il est nécessaire de prendre une méthode de calcul spéciale et en particulier l'emploi des coefficients d'inductance (totaux) des bobinages conduit à des résultats satisfaisants.

En ce qui concerne l'étude du facteur de puissance des fours Kjellin on peut s'inspirer de cette méthode et chercher l'allure des variations du facteur d'accouplement des bobinages :

$$\frac{M^2}{L_1 L_2}$$

en fonction de la hauteur du secondaire.

Digitized by Google

Il est, en effet, très probable que le facteur de puissance variera de façon analogue à la variation du facteur d'accouplement.

M, L_1, L_2 sont les coefficients d'inductances réels des bobinages.

Pour arriver rapidement à un résultat, on peut écrire :

$$L_1 = l_1 + F$$
$$L_2 = l_2 + F$$
$$M = m + F$$

l_1, l_2 et m étant les coefficients d'inductance et de mutuelle inductance calculés sans tenir compte du circuit magnétique.

l_1, l_2 peuvent se calculer à l'aide des formules et tables de Nagasaka.

m s'obtient assez exactement en décomposant chaque bobinage en plusieurs spires équivalentes et en calculant les inductances mutuelles des cercles deux par deux.

On arrive à une expression de la forme :

$$\frac{M^2}{L_1 L_2} = A + \frac{m l_1}{B} + \frac{m^2}{B}$$

A et B étant des constantes pour un four donné.

Pour un four dans lequel le diamètre du secondaire serait le double de celui du primaire et dont la hauteur du primaire serait les $\frac{4}{10}$ du diamètre du primaire, on arrive aux valeurs suivantes :

$$\frac{M^2}{L_1 L_2} = 0{,}545 + \frac{0{,}91 m}{l_1}$$

le terme suivant, en m^2, peut être négligé.

Si la hauteur du secondaire varie, le facteur d'accouplement variera à cause des variations de m.

En général, la valeur de m passe par un maximum qui est assez voisin de la valeur correspondant à la charge maxima.

On peut donc dire que dans le cas de marche à puissance constante la courbe du facteur de puissance en fonction de la charge sera une courbe assez aplatie et qu'elle pourra présenter un maximum.

Remarque II. — L'influence du circuit magnétique n'est certainement pas négligeable.

Dans le cas d'une faible charge (faible hauteur du secondaire) le courant secondaire est plus éloigné de la branche horizontale inférieure; il en résulte une dissymétrie notable des fuites du secondaire. Cette dissymétrie des lignes de force du flux de fuites du secondaire provoque une saturation et une désaturation de certaines parties du circuit magnétique, et d'après l'importance de la dissymétrie et les

Digitized by Google

formes géométriques du circuit, la puissance magnétisante est soumise à des variations qui peuvent être importantes.

L'influence du circuit magnétique, peut donc modifier les conclusions que l'on peut tirer de la seule considération des deux bobinages primaire et secondaire.

Cette influence doit être grande pour les cas de très *faibles* et de *très fortes charges.*

SÉANCE DU 18 JUIN 1927. — M. CHAUMAT signale l'hommage rendu aux travaux de la 3e section de la Société Française des Electriciens, par la *Revue de l'Aluminium et de ses applications* qui a publié, dans son numéro d'avril-mai 1927; un exposé de la communication faite par M. SUHR sur *l'Almelec.*

Les fours à induction (suite et fin), par M. BUNET.

Remarque sur les fours à haute fréquence.

Leur alimentation peut être faite par des alternateurs et alors la fréquence est parfaitement déterminée. Quand on emploïe la décharge oscillante la fréquence est environ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

et L se compose de l'inductance placée éventuellement en série avec le four et de l'inductance équivalente du four. Celle-ci, liée à son facteur de puissance propre, augmente quand celui-ci diminue. Avec un appareillage donné, on aura donc une fréquence variable en chauffant des corps différents. Si le corps est très conducteur comme du cuivre, le facteur de puissance propre du four est bas, donc L augmente, la fréquence diminue, ce qui est favorable; il y a une sorte d'adaptation de la fréquence à la matière à chauffer.

Après avoir établi des formules suffisamment pratiques pour calculer des fours à induction de diverses formes, nous devons maintenant examiner si ces formules ne nous conduïsent pas à apercevoir des perfectionnements.

I. — Les fours à rigole du modèle ancien exigent de fort basses fréquences ce qui conduit à des groupes lourds et coûteux, en conservant un facteur de puissance encore médiocre. Ne peut-on les améliorer ? Au lieu de disposer le primaire le plus près possible du noyau magné-

Digitized by Google

tique, il faudrait le placer le plus près possible de la spire secondaire. Pour retirer tous les inconvénients d'un enroulement ainsi disposé, il faudrait n'employer que très peu de spires, une ou deux même, c'est-a-dire adopter une très basse tension. On constitue alors un transformateur se rapprochant des transformateurs ordinaires, la différence principale étant l'augmentation relative du rayon des enroulements. Pour diminuer l'inductance on divisera en deux le primaire, en plaçant les deux moitiés de chaque côté du secondaire.

On calcule aisément qu'on obtiendra avec cette disposition, un meilleur facteur de puissance et souvent un meilleur rendement qu'avec la disposition ordinaire, même en tenant compte de la nécessité d'une double transformation.

Remarquons que la spire secondaire étant entre les deux moitiés de l'enroulement primaire n'a plus d'efforts radiaux, donc plus de dénivellation, plus d'oscillation de la surface.

La première transformation, depuis la tension du réseau, pourra s'exécuter à part ou encore sur la branche du noyau magnétique inutilisée, selon la disposition de la figure 5.

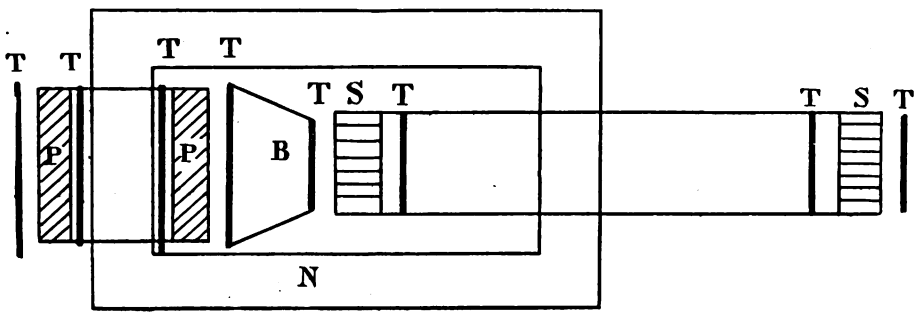


Fig. 5.

P. Primaire.
S. Secondaire.
T. Tertiaire.
B. Barres de liaison des tertiaires.
N. Noyau.

L'isolement des barres et spires n'a pas besoin d'être plus grand que celui de la rigole de travail; on peut donc noyer le tout dans la brique, le refroidir ou non, car on peut chauffer à 300 ou 400°C sans autre inconvénient qu'une augmentation de résistance.

Exemple. — Pour un four Kjellin, on trouve en suivant sur quelques plans publiés, une section de spire de 400 cm², avec 400 cm de longueur. La tension serait 7V et le courant 30 000 A, soit une résis-

Digitized by Google

tance de 233.10^{-6} ohm et une résistivité de 233^{-6} ohm-cm. Le calcul approximatif relevé sur le plan, nous a donné une inductance de fuites de $3{,}5.10^{-6}$ henry. Donc à 50 p : s on aurait

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{3{,}5.50.2\pi}{233} = 4{,}75 \qquad \text{et} \qquad \cos\varphi = 0{,}2,$$

et à 13,5 p : s $\operatorname{tg}\varphi = 1{,}25$, $\cos\varphi = 0{,}62$ ce qui est conforme à ce qui est publié.

Avec la disposition que nous avons décrite, nous aurions la figure 6;

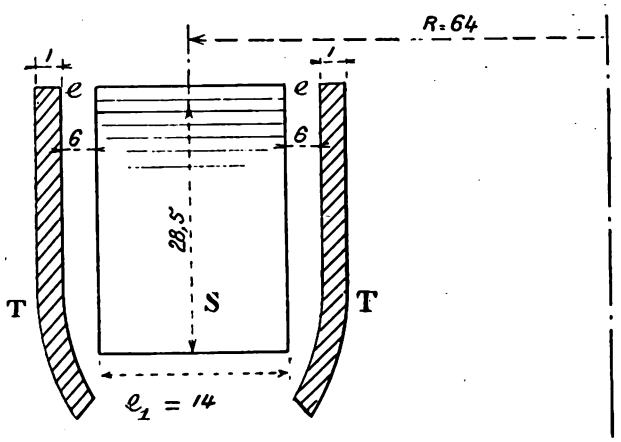


Fig. 6.

nous appliquerions la formule de l dans les transformateurs ce qui est à peu près exact :

$$l = 4{,}2\,\frac{R_m}{h_m}\left(e + \frac{e_1 + e_2}{6}\right)\cdot 10^{-8} \text{ henry}$$

$R_m = 64$ cm,
$h_m = 25$ cm,

$e = 6$,	$l = 0{,}93.10^{-6}$ henry,		
$e_1 = 14$,	$f = 50$,	$\operatorname{tg}\varphi = 1{,}25$,	$\cos\varphi = 0{,}625$,
$e_2 = 2$,	$f = 25$,	$\operatorname{tg}\varphi = 0{,}625$,	$\cos\varphi = 0{,}85$.

On voit ainsi la possibilité d'alimenter les fours à des fréquences bien plus élevées.

La puissance magnétisante de la première transformation est à peu près négligeable; tout au plus peut-elle changer le facteur de puissance définitif d'un point ou deux.

La masse de cuivre des tertiaires est de l'ordre de 500 kg avec une perte modérée. On peut raisonner ainsi : le cuivre est 50 fois moins résistant que l'acier fondu; nous avons un four d'une tonne d'acier; le

Digitized by Google

même volume de cuivre est 1,25 T; pour même perte Joule on aurait $\frac{1250}{50} = 25$ kg pour les enroulements T, avec une perte de 6 pour cent, ils auraient $\frac{25}{0{,}06} = 400$ kg environ, et avec les spires autour du primaire 500 kg environ. Le prix n'est pas à comparer avec un groupe transformant du triphasé 50 p : s en monophasé 13,5 p : s pour 1 600 kVA, qui perdrait bien plus de 6 pour cent.

Un facteur de puissance de 0,625 est à la rigueur acceptable pour une partie d'une grande installation. On le remonterait, s'il le fallait, avec celui de l'ensemble par des moteurs synchronés.

Naturellement, il reste le déséquilibrage. Mais on peut faire des fours polyphasés, diphasés par exemple à double spire S, ou avoir des fours par nombre pair.

On peut disposer les spires T autour de S de manière que le flux de fuite entre S et T soit dirigé et allongé, ce qui réduit l. On peut le forcer aussi à couper les spires T en les prolongeant autour de S. L'inductance est réduite; on introduit des courants de Foucault qu'on diminue en forçant la section de cuivre. Tout cela est une question de cas particulier.

Remarque. — Cette disposition n'est pas à confondre avec celle dite Grœnwall, dans laquelle on dispose des circuits T qu'on s'astreint à faire suivre les noyaux magnétiques au plus près. Il faut, au contraire, abandonner le noyau dans la partie qui entoure S et suivre S au plus près. C'est seulement ainsi qu'on améliore au mieux le facteur de puissance.

II. — Une disposition analogue s'emploiera dans les fours à noyau magnétique et spire mince. On peut ainsi rapprocher les circuits de beaucoup, ou placer le circuit T dans une partie très chaude des appareils.

III. — Pour continuer l'exposé des possibilités d'emploi des fréquences normales, revenons sur le chauffage des liquides ou autres corps par four sans fer dont nous avons parlé. C'est le cas d'une enveloppe métallique. Nous avons vu qu'on peut atteindre :

$$\cos\varphi = \frac{1}{2s-1}, \qquad \text{si} \qquad f = \frac{R_2 A_m}{8\pi^2 S_2}\sqrt{\frac{s}{s-1}}\cdot 10^9.$$

Avec une paroi métallique R_2 est très faible, donc f sera modéré; de plus les températures étant basses, 100°C ou un peu plus, on peut rapprocher beaucoup les enroulements, s est faible et cos φ passable.

Digitized by Google

Exemple : Récipient de 30 cm de diamètre, 30 cm de hauteur, contenant 20 kg d'eau. La paroi est de 2 mm, en cuivre; négligeons le fond : à 100°C, $R_2 = 2{,}25.10^{-6}$

$$\frac{\pi.30}{0{,}2.30}\ 10^{-6} = 35.10^{-6}.$$

Pour y dissiper 100 kW il faut 53 500 A, avec 1,87 V.

Nous placerons autour 40 spires de 1,7 cm² : masse 65 kg; perte 11,2 kW. Avec un diamètre moyen de 34,6 cm $s = 1{,}33$ $\cos\varphi = 0{,}60$ (sans tenir compte de la perte primaire ; avec elle il est de 0,64) ; $f = 50$. La température s'élèvera de plus de 1°C par seconde, ce qu'on ne peut obtenir avec des serpentins de vapeur dans ce petit espace ; le chauffage par résistance plus délicat encombrerait le récipient.

IV. — Les fours à haute fréquence sont appelés généralement fours sans fer. Mais la suppression complète du fer n'est pas désirable. On avait en vue d'abord des fréquences énormes. Mais pour 500, 1 000 et même 2 000 p : s, on peut garder les tôles au silicium à faibles pertes avec des épaisseurs acceptables. En ajoutant du fer à l'extérieur seulement, c'est-à-dire en n'encombrant pas le creuset, on peut remonter le facteur de puissance, surtout si le solénoïde est court pour sa section (fig. 7). Quelques noyaux N seront disposés autour du four.

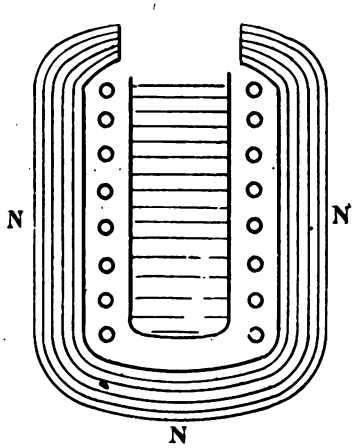


Fig. 7.

En plus de l'amélioration du facteur de puissance, on dirige le flux qui ne va plus couper les corps voisins ; on peut donc plus facilement faire des fours blindés, oscillants, à marche continue, etc... On peut faire des fours chauffant différemment dans diverses parties, selon la

Digitized by Google

fig. 8, avec des alimentations polyphasées ou réglées différemment selon le moment de l'opération.

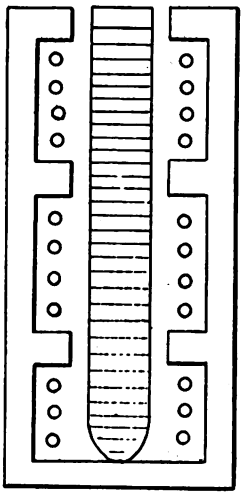


Fig. 8.

V. — Nous avons vu que lorsqu'on chauffe un corps conducteur on a un effet de peau qui, à la limite, introduit une réactance égale à la résistance. Le facteur de puissance est plus bas, beaucoup plus bas quelquefois que si on chauffait un réel tube. On gagnera donc beaucoup à introduire dans le creuset une pièce qui ne gênera pas les courants superficiels, mais qui gênera les courants centraux. Cette pièce de forme variable avec l'opération à effectuer, peut être mobile et enlevée du creuset pour son chargement ou pour agiter les matières, etc.

En résumé, on voit que bien des progrès peuvent encore être faits en ce qui concerne les fours à induction. Nous en avons indiqué quelques-uns, il y en a d'autres encore à découvrir.

Les génératrices de haute fréquence et les condensateurs paraissent encore à travailler. Nous avons indiqué une voie possible de construction de génératrices et de transformateurs de fréquence sur laquelle nous reviendrons ultérieurement. Elle consiste à développer la production d'harmoniques de denture dans les circuits spécialement disposés.

M. Levasseur fait observer que l'épaisseur de 6 cm dont a parlé M. Bunet pour le réfractaire séparant l'acier liquide du cuivre induc-

Digitized by Google

teur, dans l'un des types de fours projetés, correspond peut-être à une vue un peu trop optimiste. En effet, on pourrait craindre que le réfractaire ne se perce, ce qui amènerait la destruction de la bande de cuivre et la perte de la charge d'acier ; et d'autre part, les garnissages basiques, notamment ceux de magnésie, devenant conducteurs au rouge, des court-circuits seraient aussi à redouter.

M. BUNET répond qu'il n'a donné cette distance de 6 cm qu'à titre d'exemple et que même si elle devait être doublée, il n'en résulterait pas une grande diminution du facteur de puissance.

4e SECTION. — DISTRIBUTION GÉNÉRALE. — CANALISATIONS. TRACTION.

Présidence de M. PÉRIDIER.

SÉANCE DU 20 JUIN 1927. — MM. GUÉRY et DELLA RICCIA résument les rapports qu'ils présenteront à la semaine d'octobre 1927 sur la *récupération en traction électrique.*

5e SECTION
TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE. — TRANSMISSION PAR ONDES

SÉANCE DU 10 JUIN 1927. — *Les nouvelles applications des cellules photo-électriques basées sur l'emploi d'un éclairage périodique : applications aux instruments de musique*, par M. TOULON.

La principale difficulté que l'on rencontre, lorsque l'on cherche à utiliser les cellules photo-électriques, provient de la faible valeur des courants obtenus. Une lampe de 20 bougies placée à 20 cm d'une cellule par exemple, donne un courant qui n'atteint pas le micro-ampère. On est donc le plus souvent amené à associer les triodes aux cellules photo-électriques. L'amplificateur à courant continu, à contre batterie, malgré son intérêt et la grande amplification qu'il permet d'obtenir en régime permanent, soulève de très nombreuses difficultés, dès que le nombre des étages augmente.

Une méthode beaucoup plus pratique pour employer les cellules, consiste à faire usage d'un éclat lumineux périodiquement interrompu, à fréquence musicale par exemple. Une amplification considérable et dépourvue d'inertie sensible, peut alors être obtenue à l'aide d'un petit nombre de lampes. Les mesures doivent naturellement être

Digitized by Google

effectuées par une méthode de 0, car les caractéristiques de l'amplificateur sont impossibles à prédéterminer et à rendre fixes au cours de la mesure. Cette méthode affranchit également des défauts d'isolements de la cellule, ainsi que des lumières incidentes parasites continues qui n'agissent pas sur l'amplificateur à basse fréquence.

Les applications de ce procédé d'amplification sont très nombreuses : Exploration des messages téléautographiques, téléphonie optique, comparaison des éclats des sources lumineuses, chronométrage des courses, relevés goniométriques, etc...

L'emploi de l'amplificateur à basse fréquence associé à la cellule est très intéressant en acoustique et permet notamment la réalisation d'instruments de musique. La reproduction d'un enregistrement effectué sur film cinématographique, peut être obtenu facilement dans d'excellentes conditions. On est affranchi de toutes les difficultés qui proviennent du frottement de l'aiguille sur le disque de phonographe.

Une application curieuse consiste à réaliser un piano à l'aide d'un disque perforé, comportant un certain nombre de cercles concentriques et tournant d'un mouvement continu uniforme devant une source lumineuse. Si les nombres des trous de chacun des cercles sont convenablement choisis (ancien disque de Savart), on peut facilement obtenir les différentes notes de la gamme.

Le disque perforé est avantageusement remplacé par une plaque photographique reproduisant, à une échelle réduite, l'image de fentes très fines. Cette disposition permet de varier la tonalité du son produit en disposant des caches de longueur ou d'opacité variable au cours de la période sur le trajet des rayons lumineux qui tombent sur la cellule.

(Présentation d'un cellulophane basé sur ce principe). Les notes du clavier sont reliées à des miroirs qui renvoient sur la cellule les rayons lumineux coupés à différentes fréquences.

On peut envisager d'autres applications de ce disque perforé : machine à lire pour aveugle, par exemple. La reconstitution complète des sons produits par la voix, peut également être réalisée en remplaçant les rangées de trous par des enregistrements photographiques obtenus à partir d'un microphone et d'un oscillographe, et correspondant aux différentes consonnances de l'alphabet. L'emploi de rayons lumineux est extrêmement commode, car à l'aide de miroir, prismes et objectifs, on peut les transporter où l'on veut et à l'échelle convenable.

La très grande facilité d'emploi des cellules photo-électriques asso-

Digitized by Google

ciées aux amplificateurs à basse fréquence, est particulièrement remarquable et il n'est pas douteux que d'ici quelques années, cette méthode trouve de nombreuses applications. C'est pourquoi nous avons pensé que la 5e Section des Electriciens devait être mise au courant de ces applications qui nécessitent des amplificateurs d'une construction particulièrement soignée.

M. JULIA résume son rapport sur « *l'état actuel des câbles téléphoniques à longue distance* », et M. LANGE donne des renseignements sur « *les étouffeurs d'échos* ».

Ces deux rapports seront présentés à la prochaine séance d'octobre.

Digitized by Google

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ [1]

Production et utilisation mécanique de l'électricité.

Institut national roumain pour l'étude de l'aménagement et de l'utilisation des sources d'énergie. — Publication n° 2 : *Puissances réactives et fictives*, par C. Budeanu, Professeur à l'Ecole Polytechnique de Bucarest. — Bucarest, 1927; un vol. broché 23cm × 16cm, de 360 pages, avec 48 figures. Publication n° 4 : *Les différentes opinions et conceptions concernant la notion de puissance réactive en régime non sinusoïdal*, par C. Budeanu. — Bucarest, 1927 ; un vol. broché 28cm × 21cm, de 47 pages, avec 1 figure.

Publication n° 5 : *Considérations sur l'auto-excitation des alternateurs branchés aux lignes de haute tension*, par Georges Petresco, Ingénieur de la Société anonyme roumaine « Electrica ». — Bucarest, 1927 ; un vol. broché 23cm × 16cm, de 29 pages, avec 14 figures. (Don de l'Institut national roumain).

Mathématiques. — Mécanique.

Leçons choisies de Mécanique. I : *Les principes de la mécanique des Ressorts.* — II. *Le choc des corps solides. Théorie, expérimentation, utilisation*, par A. Boulanger, Directeur des Etudes à l'Ecole Polytechnique, Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1927 ; 2 vol. brochés 22cm × 14cm, de 86 pages avec 41 figures, et de 64 pages, avec 23 figures et 2 planches hors texte. (Don de l'éditeur).

Quelques propriétés d'un triangle de nombres impairs, par M. Juppont. — Toulouse, les frères Douladoure, 1920; une brochure 24cm × 16cm, de 6 pages. (Extrait des « Mémoires de l'Académie des sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse », 11e série tome VIII). (Don de l'auteur).

La véritable Géométrie d'Euclide et la Relativité d'Einstein par M. P. Juppont. Toulouse, les frères Douladoure, 1924 ; une brochure 24cm × 16cm, de 18 pages. (Extrait des « Mémoires de l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse », 12e série, tome I). (Don de l'auteur).

De la mécanique classique à la relativité naturelle, par M. Juppont. — Toulouse, Impr. J. Bonnet 1926 ; une brochure 24cm × 16cm, de 24 pages. (Extrait des « Mémoires de l'Académie des sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse », 12e série, tome IV). (Don de l'auteur).

Généralités. — Etudes théoriques. — Recherches physiques.

L'Electricité, par Lucien Poincaré, Directeur au Ministère de l'Instruction publique. — Edition refondue et augmentée par Paul Bunet, Ingénieur, ancien Vice-Président de la Société française des Electriciens. — Paris, Ernest Flammarion, éditeur, 1927 ; un vol. broché 19cm × 12cm, de 293 pages. (Bibliothèque de philosophie scientifique). Don de M. P. Bunet). (Prix 13 fr.).

---

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société française des Electriciens, 14, rue de Staël, de 14 à 17 heures, tous les jours sauf le Dimanche.

Digitized by Google

Contribution à l'étude de l'effet Wiedemann, considéré comme un cas particulier de la magnétostriction. *Etude théorique et expérimentale*, par E. Fromy. (Thèse de doctorat ès-sciences physiques). — Paris, Masson et Cie. 1927; un vol. broché 23cm × 14cm, de 113 pages avec 35 figures. (Don de l'auteur).

Annales de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris et du Bureau central de Magnétisme terrestre, publiées par les soins de Ch. Maurain. *Tome V.*— Paris Les Presses Universitaires de France, 1927; un vol. broché 31cm × 25cm, de 129 pages, avec figures et graphiques hors texte. (Don de l'Institut de Physique du Globe).

Les Aimants, leur calcul et la technique de leurs applications, par R. V. Picou, Ingénieur des Arts et Manufactures, Lauréat de l'Institut. — Paris, Dunod, 1927; un vol. broché 25cm,5 × 16cm,5, de 109 pages, avec 76 figures. (Don de l'Auteur). (Prix : 21 fr.).

Congrès. — Expositions. — Sociétés. — Syndicats.
Actes officiels. — Etudes économiques. — Inventaires.
Statistiques, etc.

De Laval Centrifugal Review. — Revue Bimestrielle illustrée 37cm × 27cm, publiée à New-York. — *Tomes I à VI*, 1921-1927. (Don de la Société de Laval).

Union internationale de tramways, de chemins de fer d'intérêt local et de transports publics automobiles — **XXme Congrès International de Tramways, de Chemins de fer d'intérêt local et de Transports publics automobiles.** — *Barcelone, 10-16 octobre 1926.* — *Comptes rendus détaillés.* — Bruxelles, Secrétariat général de l'union, 1927; un vol cartonné 27cm × 22cm, de 614 pages, avec nombreuses figures et tableaux hors texte. (Don de l'Union).

Ministère de l'Agriculture. Direction générale des Eaux et Forêts : 2e partie, Eaux et Génie rural. — **Electrification des campagnes.** — *Mission en Suède.* — Rapport général de M. Talureau, Ingénieur adjoint du Génie rural. (Extrait des « Annales », fascicule 55). — Paris, Imprimerie Nationale, 1926; un vol. broché 28cm × 18cm, de 127 pages, avec 91 figures. (Don du Ministère de l'Agriculture).

Institut International de Bibliographie. Publication n° 152. — **La Classification décimale.** *Exposé du système et tables abrégées.* — Bruxelles, Palais Mondial, 1927; un vol. broché 26cm × 19cm,5, de 57 pages. (Don de l'Institut International de Bibliographie.)

Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, heraus. gegeben durch das Generalsekretariat des V. D. E — *Vierzehute Auflage*, nach dem Stande am 1. Juli 1926. — Berlin Verlag von Julius Springer-1927; un vol. relié toile 21cm × 15cm de IX-836 pages avec figures et tableaux hors texte. (Acquis pour la Bibliothèque).

Principes d'organisation scientifique, par Frédéric Winslow Taylor, ancien Président de la Société américaine des Ingénieurs Mécaniciens. Traduction de Jean Royer, Ingénieur des Arts et Manufactures. Préface de Henry Le Chatelier, Membre de l'Institut. Edition définitive. — Paris, Dunod, 1927; un vol. broché 25cm × 16cm, de 117 pages. (Don de Madame F. W. Taylor). Prix : 12 fr. 05.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Publication subventionnée par la Confédération des Sociétés scientifiques françaises à l'aide des fonds alloués par le Parlement.

Production et utilisation mécanique de l'électricité

La Transformation de l'Energie électrique. — I. Transformateur, par R. Carton et P. Dumartin. Préface de G. Darrieus ; un vol. broché de 217 pages, avec 89 figures. (Collection Armand Collin 1926).

Ce volume qui constitue la première partie d'un ouvrage sur la Transformation de l'Energie électrique, est spécialement consacré à l'étude des transformateurs statiques.

Après avoir rappelé dans un premier chapitre la théorie générale de fonctionnement de ces appareils, sous forme algébrique et graphique, les auteurs s'étendent longuement sur les caractéristiques de fonctionnement des appareils industriels. Le calcul de la dispersion, l'étude des efforts électrodynamiques dus aux court-circuits, des surintensités consécutives à la mise sous tension, et de la naissance d'harmoniques dans le courant magnétisant, font l'objet de développements spéciaux.

Un long chapitre est ensuite consacré à l'étude de la construction proprement dite des transformateurs, où est décrite la constitution des différents types de circuits magnétiques et d'enroulements en usage dans les transformateurs modernes.

L'ouvrage se termine par un chapitre sur les transformateurs de phase, et enfin par quelques considérations sur les transformateurs de fréquence.

Ce manuel fait honneur à la section d'Electricité industrielle de la collection Armand Colin qui comprend déjà d'excellents ouvrages.

Transformation de puissance. — Bobine d'inductance, par Marcel Mathieu, Ingénieur (A. et M., E. S. E.), Ingénieur à la Société française des régulateurs universels « Arca » ; 1 volume 12 × 19, 305 p., 84 fig. Paris. Albert Blanchard. (Don de l'éditeur).

Cet ouvrage est le premier d'une « Nouvelle Encyclopédie Electro-Mécanique » que présente la Librairie scientifique Albert Blanchard.

On serait peut-être tenté de regretter que l'effort encyclopédique se dispersât actuellement entre tant de collections qui manquent trop souvent de l'unité de vues nécessaire pour bien fixer un cadre et un programme leur assurant le caractère particulier qu'elles revendiquent par leur titre même. Mais on doit reconnaître que l'on rencontre, parmi les éléments disparates qui les constituent, des ouvrages intéressants qui n'auraient peut-être pu voir le jour sans leur protection C'est au nombre de ces derniers que prend place le livre de M. Mathieu, qui comprend deux parties bien distinctes.

Dans la première partie, l'auteur traite de façon très complète « dans sa réalité industrielle » suivant sa propre expression, la question des transformateurs statiques. Il limite son étude aux appareils de ce genre qui peuvent être traversés de façon permanente par une puissance appréciable pour alimenter des récepteurs de toute nature (lampes, moteurs...) et que l'on désigne par l'expression abrégée, mais dépourvue de toute signification, de « Transformateurs de puissance », lais-

Digitized by Google

sant de côté les appareils dans lesquels on ne met en jeu que la puissance très faible nécessaire pour alimenter des appareils de mesure connus sous le nom de « Transformateurs de mesure ». Il serait à souhaiter que ces appellations aussi incorrectes l'une que l'autre soient bannies du vocabulaire électrotechnique.

L'attention du lecteur sera retenue plus particulièrement par le chapitre II consacré à l'étude des circuits magnétiques où l'on trouvera nombre de détails intéressants sur la construction des transformateurs modernes, dans lesquels on a réalisé, avec l'aide de métallurgistes, des perfectionnements considérables sur leurs devanciers d'il y a 20 ans, et par le chapitre III qui porte sur les enroulements, complété par le chapitre IV dans lequel sont traités les isolements, question capitale pour ce genre d'appareils où l'on atteint des tensions inconnues dans les autres types de machines électriques.

La deuxième partie est consacrée tout entière à l'étude des « Bobines d'inductance ». L'auteur y aborde en particulier avec beaucoup de détails le calcul des bobines sans fin aux chapitres XI, XII, XIII et XIV.

Electrochimie

Principes de l'Electrochimie, par J. Ponsinet, Ingénieur des Manufactures de l'Etat. — Collection Armand Colin 1927. 1 vol. broché 19 cm × 11 cm, de 215 pages, 35 figures (don de l'Editeur).

Cet excellent petit ouvrage, expose les faits essentiels et les lois de l'électrochimie. Il ne fait qu'esquisser, dans un dernier chapitre, les principales applications (piles, accumulateurs, oxydations et réductions, électrolyse des chlorures alcalins, séparation électrolytique des métaux, électrolyse des sels fondus) et simplement pour en indiquer le principe.

Après un rappel des lois de l'électrolyse (définition des électrolytes, action du courant sur ces électrolytes, actions secondaires, dispositifs d'électrolyse, lois quantitatives de l'électrolyse et leur application à la mesure des quantités d'électricité), l'auteur étudie le mécanisme de l'électrolyse d'après la théorie des ions (application de la loi d'action des masses à la dissociation électrolytique, coefficient d'ionisation et sa mesure.

Un troisième chapitre plus important traite de la conductibilité des électrolytes (mesures des conductivités expression de la conductibilité dans la théorie des ions, mesure du coefficient d'ionisation et de la constante de dissociation, d'après la conductivité, loi de Kohlrausch, variation de la conductivité avec différents facteurs, conductivité des sels fondus, des mélanges d'électrolytes, application des mesures de conductivité à l'analyse).

Le chapitre IV est relatif aux propriétés des ions (migration, mobilité des ions, sa variation avec la concentration et la température, applications de la migration, hydrolyse, détermination de la constante de dissociation, des solubilités de sels peu solubles, rôle des ions dans les théories actuelles de la physique).

C'est la tension électrique qui fait l'objet de la plus longue étude (formules de Thomson et d'Helmholtz, tensions de concentration, différence de potentiel entre un métal et la solution d'un de ses sels, différence de potentiel au contact de deux électrolytes, électrodes à anions, à oxydation et réduction, électrodes de comparaison, tension de décomposition des électrolytes surtensions, séparation des ions par électrolyse, polarisation et dépolarisants, rendement des électrolyses).

Un petit chapitre est enfin réservé à l'étude des concentrations en ions hydrogène, (définition de pu ou exposant d'hydrogène, sa mesure, titrage des bases par les acides, activité des ions). La mesure de ces concentrations a acquis, en effet, une assez grande importance pratique.

En résumé, l'ouvrage de M. J. Ponsinet, fait mieux que répondre à la devise de la Collection Armand Colin : vulgariser sans abaisser. Il constitue un travail que liront avec profit tous les électrochimistes.

Recherches physiques.

Tables annuelles de constantes et données numériques Données numériques d Electricité, magnétisme et électrochimie, par A Buffat, G -I. Higson, K. Gordon et Malapert. — Extrait du volume V (années 1917 à 1922). — Paris Gauth. Villars et Cie 1926.

Digitized by Google

Nous signalons aux lecteurs du *Bulletin de la Société française des Electriciens* l'apparition de ce nouveau volume de données numériques qui comprend 51 pages concernant l'électricité et le magnétisme et 84 pages pour la conductibilité des électrolytes, les équivalents électrochimiques et les forces électromotrices.

Mesures électriques, par J. GRANIER (200 pages). — Paris, librairie A. Colin, 1927.

Les « Mesures électriques » de M. J. Granier condensent en un petit nombre de pages beaucoup de renseignements utiles concernant les mesures électriques et magnétiques (courants, résistances, tensions, quantités d'électricité, capacités, propriétés magnétiques, inductances, puissances, énergie, forme des courants, déphasages, fréquences).

Les questions de sensibilité des appareils et les méthodes de mesure sont particulièrement bien traitées et, d'une manière générale, l exposition est très claire et la lecture en est facile. Signalons toutefois les petites imperfections suivantes : deux méthodes de mesure de la perte d'énergie par hystérésis sont données comme équivalentes, alors que l'une concerne l'hystérésis alternative et l'autre l'hystérésis tournante et, au chapitre des unités, on omet de faire la distinction entre le gramme-masse et le gramme-poids.

Digitized by Google

IL Y A 30 ANS

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du 7 Juillet 1897

Présidence de M. J. VIOLLE, vice-président.

I. M. LAPORTE, chef du Service des recherches créé en avril 1897 au Laboratoire Central d'Electricité, expose les travaux qu'il vient d'exécuter sur les *coupe-circuits et les fils fusibles*. Il montre que l'intensité de fusion n'obéit pas tout à fait, même pour de longs fils, à la loi de Preece $I = Kd^{\frac{3}{2}}$

M. ABRAHAM, présente *le rhéographe à induction Abraham-Carpentier*. Après avoir rappelé sommairement les méthodes antérieures d'enregistrement des courbes de courant alternatif, par analyse harmonique (PUPIN, CLAUDEL, BLONDEL), par méthodes électrooptiques (HESS, déviation des rayons cathodiques de BRAUN et de HESSS, phénomènes de HERR, polarisation rotatoire magnétique de d'ARSONVAL, GREHERE, PIONCHON), par méthode électrochimique (JANET), par méthodes électriques (JOUBERT), par méthodes rhéographiques (ARNOUX, CRIC, GÉRARD, FROELICH, ELICHER, THOMSON), par l'oscillographe Blondel qu'il décrit, il expose sa propre méthode, fait fonctionner son appareil et projette des courbes qu'il a pu obtenir sur diverses machines.

II. Résumé d'une conférence de PREECE, devant la Royal Institution sur la télégraphie sans fil installée par MARCONI, le transmetteur est un excitateur de HERTY, produisant des ondes de 1 m, le récepteur est un cohéreur de Branly, muni d'un trembleur Marconi. La transmission faite au travers d'un canal de Bristol, a atteint *14 kilomètres*.

L'Imprimeur-Editeur : Etienne CHIRON, Paris.

Digitized by Google

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Rapports (1) présentés à la Semaine d'Octobre 1927, qui se tiendra du Lundi 24 au Samedi 29 Octobre inclus (2).

1re Section. — Introduction à l'étude analytique de l'échauffement des machines électriques (M. Roth), p. 480.

1° Texte.

2° Table des matières.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

(2) Les autres rapports présentés paraîtront dans les *Bulletins* de Septembre et d'Octobre 1927.

Digitized by Google

INTRODUCTION A L'ÉTUDE ANALYTIQUE DE L'ÉCHAUFFEMENT DES MACHINES ÉLECTRIQUES [1]

par E. Roth,

Ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécaniques.

I. — Introduction.

La prédétermination de la température des différents organes d'une machine électrique a été de tout temps une des principales préoccupations des constructeurs. Pendant longtemps ceux-ci ont dû se contenter, pour l'établissement des projets de machines nouvelles, des résultats de mesures faites sur des machines existantes, méthode empirique dont l'insuffisance a bientôt été reconnue; aussi de nombreuses études analytiques ont-elles été entreprises, destinées à donner des bases scientifiques au calcul de l'échauffement. Nous en donnerons à la fin de cette étude une bibliographie, puisée dans la littérature technique internationale dont nous pouvions disposer.

Mais l'examen de questions de ce genre se heurte à de grandes difficultés mathématiques, qui ne permettent pas de traiter en toute rigueur le problème dans son ensemble; même lorsqu'il s'agit d'étudier l'échauffement d'une seule partie d'une machine et, à plus forte raison, lorsque les recherches portent sur un ensemble d'organes, on est amené à faire des hypothèses simplificatrices. Malgré ces simplifications, les résultats de ces études fournissent actuellement au constructeur des moyens pour prédéterminer, avec une précision pratiquement suffisante, les échauffements des différentes parties de ses machines, mais il sera toujours obligé de soumettre à un sérieux contrôle expérimental les résultats de ses calculs.

Il ne sera jamais possible de s'affranchir de toute hypothèse. C'est ainsi que nos études sont basées sur la loi de Newton, qui admet que la quantité de chaleur émise par un corps vers l'air ambiant, par convection et rayonnement, est proportionnelle à la différence de température entre la surface du corps et celle de l'air ambiant. Or, cette hypothèse n'est pas confirmée par la pratique, qui donne une

(1) Mémoire dédié au corps des professeurs de l'école polytechnique de Brno (Tchéco-slovaquie).

Digitized by Google

loi beaucoup plus compliquée; mais sans cette hypothèse aucun calcul ne serait plus possible. Cette loi est toutefois vraie entre certaines limites, et pour les applications, il suffit d'admettre les coefficients pratiques, déduits de l'expérience, qui correspondent à une moyenne de la température de la surface du corps considéré. Nous verrons dans la suite, sur quelques exemples pratiques, que les résultats de l'expérience cadrent parfaitement avec les calculs basés sur cette hypothèse.

La détermination des coefficients d'émission de chaleur et de conductibilité thermique a fait l'objet de nombreuses recherches des physiciens et des ingénieurs; nous donnerons dans le cours de cette étude une liste des coefficients, nécessaires pour les applications pratiques, tirés des nombreuses études publiées à ce sujet, en y ajoutant ceux donnés par notre propre expérience.

Avant d'aborder l'étude de l'échauffement des machines électriques, nous rappellerons d'abord rapidement les principes fondamentaux et les équations générales de la théorie analytique de la chaleur, qui serviront de base à nos développements. Nous aurions peut-être pu nous en dispenser, car ces équations ont déjà été publiées maintes fois; nous aurions aussi pu renvoyer le lecteur aux ouvrages classiques publiés sur la théorie analytique de la chaleur, mais notre étude aurait perdu son caractère d'ensemble, sans compter qu'il nous sera possible d'introduire, dans cette partie déjà, des considérations particulières aux machines électriques. Nous ne pouvons toutefois donner ici que les développements strictement indispensables, et insistons vivement pour que le lecteur entreprenne l'étude des ouvrages classiques, avant tout de la *Théorie analytique de la Chaleur*, l'œuvre incomparable de Fourier, qui a servi de base à notre étude, et des *Leçons sur la Théorie analytique de la Chaleur*, de Lamé, auxquelles nous avons également eu recours (1).

Fourier a été le premier à aborder, il y a un peu plus d'un siècle, l'analyse de la propagation de la chaleur; c'est au cours de ces études que l'illustre mathématicien a découvert les célèbres séries qui portent son nom, et nous aurons l'occasion de montrer comment il est parvenu à cette découverte. Son œuvre a servi de point de départ à tous les ouvrages analogues ultérieurs, et c'est grâce à son génie que l'étude de ces questions a été rendue possible.

---

(1) De plus on pourra consulter utilement les ouvrages que Poisson, H. Poincaré et Boussinesq. ont publiés sur la théorie analytique de la chaleur.

Digitized by Google

Les anciens physiciens, Fourier et Lamé par exemple, ne connaissaient pas les machines électriques ; ils n'avaient pas l'occasion d'examiner des corps dans lesquels la chaleur était produite, tels que le cuivre ou le fer actif d'une machine électrique et leurs études ne s'occupaient par conséquent que de corps auxquels la chaleur devait être communiquée par contact. Dans ces conditions, la température à un endroit donné du corps répond à l'équation de Laplace et le corps représente un milieu laplacien. Dans les organes des machines électriques par contre, par exemple dans un fil de cuivre parcouru par un courant, la chaleur est produite dans l'organe même, et la température à un endroit quelconque est donnée par l'équation de Poisson. Nous aurons principalement affaire à des problèmes répondant à cette dernière équation.

Les résultats auxquels nous arrivons sont généralement d'une forme assez compliquée, car, sauf dans des cas très simples, ils ne s'expriment que par des séries ; les intégrations une fois faites, on ne rencontre toutefois pas de grandes difficultés mathématiques et les développements pourront être suivis très facilement ; d'autre part, les applications numériques se font aisément avec un peu d'habitude. Nous n'avons d'ailleurs pas la prétention d'imposer ces calculs à l'ingénieur dans chaque cas qui se présente, car nous savons qu'il ne disposerait souvent pas du temps nécessaire ; notre but est surtout de lui donner un moyen d'étudier exactement des cas spéciaux, et surtout de lui permettre d'examiner la valeur des formules approximatives dont il se sert habituellement. Nous ne nous laisserons jamais entraîner dans des spéculations purement mathématiques, mais garderons toujours en vue la réalité pratique. Toutes les formules sont suivies d'applications à des cas réels et quelquefois confirmées par des recherches expérimentales.

C'est à dessein que nous avons appelé cette étude *Introduction à l'étude analytique de l'échauffement des machines électriques*. Elle est la première partie d'un ouvrage plus complet mais permet déjà, dans sa forme actuelle, de nombreuses applications pratiques.

Un dernier point est à considérer ; une des premières conditions pour pouvoir déterminer l'échauffement d'une certaine partie d'une machine électrique est la connaissance exacte des pertes qui règnent dans l'organe considéré. Or, on sait qu'il est souvent très difficile, et quelquefois même impossible, de savoir exactement quelle est à un endroit donné la valeur des pertes, cause de l'échauffement. Le problème se heurte donc sous ce rapport également à de grandes

Digitized by Google

difficultés; mais là aussi l'expérience intervient dans une certaine mesure pour guider le constructeur et pour lui indiquer les coefficients à admettre afin de prévoir d'avance les pertes aussi exactement que possible. Ce n'est pas l'endroit ici d'étudier ces questions et nous devons renvoyer le lecteur aux nombreux ouvrages publiés à ce sujet. Dans la suite, nous devons admettre que les pertes dans l'organe dont on veut étudier l'échauffement, sont exactement connues.

II. — Lois fondamentales de la théorie analytique de la chaleur.

1. *Conductibilité intérieure et flux de chaleur.* — Fixons dans un corps homogène deux points P_1 et P_2, distants entre eux de la longueur Δx et faisons passer l'axe Ox par ces points. Nous entourons chacun de ces points par des surfaces planes s, normales à l'axe Ox et assez petites pour que la température puisse être supposée uniforme sur toute l'étendue de ces surfaces, et nous formons un cylindre de longueur Δx, ayant les surfaces s pour bases. Soient θ et $\theta + \Delta\theta$ les températures respectives des points P_1 et P_2, et supposons Δx suffisamment petit pour qu'on puisse admettre une loi linéaire de variation de température entre ces points. L'expérience prouve que dans ces conditions la quantité de chaleur ou le *flux de chaleur*, qui s'écoule à travers ce cylindre dans un temps t est proportionnel au temps, à la surface s et à la différence des températures $\Delta\theta$ entre les deux points, et inversement proportionnel à leur distance Δx. La chaleur passe du point de température plus élevée au point de température plus faible.

Cette propriété s'exprime par la formule

$$q = \mathrm{K}st\frac{\Delta\theta}{\Delta x}.$$

A la limite le quotient $\frac{\Delta\theta}{\Delta x}$ tend vers la dérivée $\frac{d\theta}{dx}$.

Nous adopterons la convention de signe généralement admise, qui attribue le sens positif au flux de chaleur quand il se déplace dans le sens positif de l'axe des x. La température est alors une fonction décroissante de l'abscisse et sa dérivée est négative (fig. 1). Nous voyons donc que la valeur q du flux de chaleur et la dérivée $\frac{d\theta}{dx}$ sont de signes contraires, de sorte que l'expression précédente, vraie en valeur absolue, devient

$$q = -\mathrm{K}st\frac{d\theta}{dx}. \qquad (1)$$

Digitized by Google

Le coefficient K prend le nom de *conductibilité calorifique ou thermique intérieure*. Sa signification devient claire si dans la formule (1) on fait $s = 1$, $l = 1$, $\frac{d\theta}{dx} = -1$, ce qui donne $q = K$. Autrement dit, K est la quantité de chaleur transmise par unité de temps, pour une différence de température égale à l'unité de température, entre deux parois de surface égale à l'unité et distantes entre elles de l'unité de longueur. En choisissant pour unité de temps la seconde,

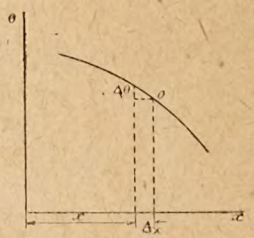


Fig. 1.

pour unité de température le degré centésimal et pour unité de longueur le centimètre, K s'exprime en gramme-calories par seconde, par degré centésimal et par cm, ou encore en watts par degré centésimal et par cm, en tenant compte de ce que 4,17 watts valent un gramme-calorie par seconde. On a par exemple, d'après Langmuir, pour le fer des tôles de transformateurs, à 4 pour cent de Si,

$$K = 0{,}075 \frac{\text{g-cal}}{s - 1^\circ - \text{cm}} = 0{,}32 \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}.$$

Jusqu'à présent nous n'avons pris en considération qu'une seule direction du flux de chaleur, mais dans le cas général, cette direction peut varier d'un point à l'autre. Nous le décomposons donc en chaque point en trois composantes, q_x, q_y, q_z, dirigées parallèlement à trois axes rectangulaires Ox, Oy, Oz. Pour chacune de ces trois composantes la formule (1) est valable, mais la température étant maintenant, à un instant donné, fonction des trois variables x, y et z, il y a lieu d'introduire les dérivées partielles $\frac{\partial\theta}{\partial x}$, $\frac{\partial\theta}{\partial y}$ et $\frac{\partial\theta}{\partial z}$.

Dans le cas le plus général, la valeur de la conductibilité intérieure dépend de la direction dans laquelle elle est prise. Nous n'examinons pas ce cas général, mais uniquement celui où les conductibilités sont différentes seulement dans les directions de trois axes rectangulaires, et nous disposons notre système de coordonnées de façon à faire coïncider ses trois axes Ox, Oy et Oz avec les directions privilégiées. Lorsque la conductibilité intérieure est la même dans toutes les direc-

Digitized by Google

tions, on dit que le corps est « isotrope » ; dans tous les cas contraires il est « anisotrope ». En désignant par K_x, K_y et K_z les conductibilités respectives, suivant les trois axes, les formules deviennent

$$(2)\qquad \begin{aligned} q_x &= -K_x st \frac{\partial \theta}{\partial x}, \\ q_y &= -K_y st \frac{\partial \theta}{\partial y}, \\ q_z &= \quad K_z st \frac{\partial \theta}{\partial z}. \end{aligned}$$

Le cas où les conductibilités sont différentes suivant deux axes perpendiculaires, existe pratiquement dans les tôles des circuits magnétiques et dans les bobines inductrices : celui où elles sont différentes

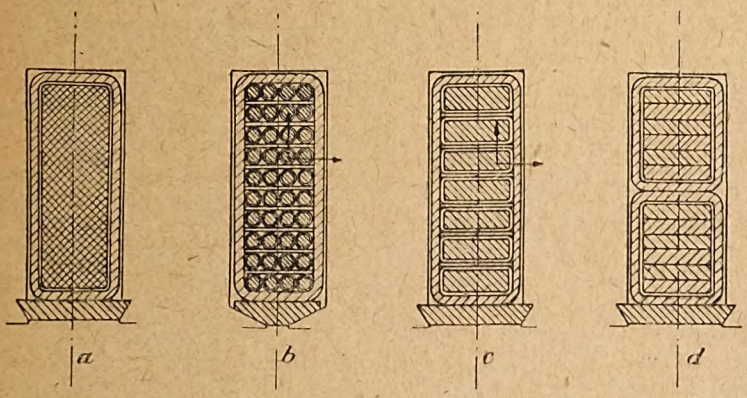


Fig. 2. — Différents types d'encoches des machines électriques.

suivant trois axes se rencontre dans les encoches des machines électriques (fig. 2*b* et 2*c*). Dans le dernier cas, en effet, la chaleur provenant du conducteur *c* passe dans la direction axiale de l'encoche uniquement dans du cuivre, mais doit traverser des isolants différents dans deux autres directions, perpendiculaires à la première.

Dans l'une quelconque de ces deux directions, la chaleur produite dans les conducteurs passe d'abord dans le cuivre et rencontre différents isolants ; de même dans la direction transversale des paquets de tôles des circuits magnétiques, le flux de chaleur trouve son chemin successivement dans le papier, dans le fer et dans une mince couche d'air, matières de conductibilités très différentes. Nous assimilons ces corps hétérogènes à des corps homogènes, produisant entre deux points la même chute de température que le corps réel, et nous remplaçons toujours les différentes conductibilités par une conductibilité unique résultante K_r. La figure 3 représente deux couches de matières

Digitized by Google

différentes, l'une d'épaisseur e_1 et de conductibilité K_1, l'autre d'épaisseur e_2 et de conductibilité K_2. On constate dans la première une chute de température de $\Delta\theta_1$, dans la deuxième de $\Delta\theta_2$. En appelant K_r la conductibilité résultante et e l'épaisseur totale, on obtient pour le flux de chaleur par unité de section et par unité de temps

$$q = K_1 \frac{\Delta\theta_1}{e_1} = K_2 \frac{\Delta\theta_2}{e_2} = K_r \frac{\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2}{e},$$

d'où il vient, tous calculs faits

$$(3) \qquad K_r = \frac{K_1 K_2 e}{K_2 e_1 + K_1 e_2}.$$

Appliquons cette formule au cas des tôles de dynamos, en suppo-

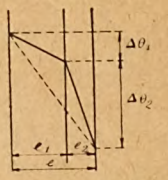


Fig. 3. — Conductibilité résultante de deux couches différentes.

sant d'abord que la pression exercée sur le paquet de tôles ait été suffisante pour faire disparaître tout matelas d'air entre les tôles. Admettons comme isolant du papier d'une épaisseur de 0,05 mm, et d'une conductibilité calorifique de 0,0013 $\frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$, et pour le fer une épaisseur de 0,5 mm. La conductibilité résultante transversale devient dans ces conditions

$$K = \frac{0.32 \times 0.0013 \times 0{,}55}{0{,}32 \times 0{,}05 + 0{,}0013 \times 0{,}5} = 0{,}014 \frac{w}{1^\circ - \text{cm}},$$

c'est-à-dire 23 fois moins que dans le sens des tôles.

Mais très souvent on a affaire à plus de deux isolants en série. Dans le cas de n isolants on a

$$q = K_1 \frac{\Delta\theta_1}{e_1} = K_2 \frac{\Delta\theta_2}{e_2} = \ldots = K_n \frac{\Delta\theta_n}{e_n} = K_r \frac{\Delta\theta}{e}.$$

On a d'autre part

$$\Delta\theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \ldots + \Delta\theta_n.$$

En exprimant tous les $\Delta\theta$ en fonction de $\Delta\theta_n$, par exemple, il vient

$$\left(\frac{K_n}{K_1}\frac{e_1}{e_n} + \frac{K_n}{K_2}\frac{e_2}{e_n} + \ldots + \frac{K_n}{K_n}\frac{e_n}{e_n}\right)\Delta\theta_n = \frac{K_n}{K_r}\frac{e}{e_n}\Delta\theta_n = \Delta\theta,$$

donc

$$(3)\,a \qquad \frac{e}{K_r} = \frac{e_1}{K_1} + \frac{e_2}{K_2} + \ldots + \frac{e_n}{K_n},$$

ce qui permet de déterminer K_r.

Digitized by Google

Reprenons notre exemple des tôles et admettons entre chaque tôle et le papier suivant, une couche d'air de 0,018 mm, en prenant pour l'air enfermé une conductibilité thermique $0{,}00024 \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

On a dans ce cas

$$e = 0{,}5 + 0{,}05 + 0{,}018 = 0{,}568 \text{ mm},$$

ce qui donne

$$\frac{0{,}568}{K_r} = \frac{0{,}5}{0{,}32} + \frac{0{,}05}{0{,}0013} + \frac{0{,}018}{0{,}00024} = 115$$

et $K_r = 0{,}00495$, ou en nombre rond $0{,}005 \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$, ce qui représente une conductibilité 64 fois moindre que celle dans le sens des tôles. Nous verrons plus loin que cette valeur de la conductibilité transversale a été confirmée par les recherches que nous avons effectuées à ce sujet. Cette conductibilité transversale dépend essentiellement de la façon dont sont comprimées les tôles et peut varier, suivant les expériences de M. Ott, entre 1/50 et 1/100 de la valeur de la conductibilité dans le sens des tôles.

Les recherches de M. P. Ehrmann ont donné 1/54 pour la valeur du rapport de la conductibilité transversale à celle dans le plan de la tôle.

En connaissant les conductibilités des matières composantes, ainsi que leur épaisseur, il est donc facile de calculer la conductibilité résultante et nous n'insisterons pas sur ce point. Nous voulons

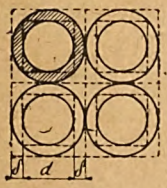


Fig. 2 bis. — Détermination de la conductibilité résultante des fils de cuivre isolés.

toutefois encore indiquer le cas très important de la conductibilité résultante du fil de cuivre isolé rond (fig. 2 *bis*) pour laquelle M. Vidmar donne la valeur

$$(3\,b) \qquad K_r = 0{,}6\, K_i \frac{d + 2\delta}{2\delta}$$

où d est le diamètre du fil nu et δ l'épaisseur simple de l'isolation.

Cette formule suppose que la conductibilité K_c du cuivre est infiniment grande par rapport à la conductibilité K_i de l'isolant ; on aurait, en effet, d'après la formule (3), pour un fil carré d'épaisseur d :

Digitized by Google

$$K_r = (d + 2\delta)\frac{K_c K_i}{dK_i + 2\delta K_c},$$

ou

$$K_r = (d + 2\delta)\frac{K_i}{2\delta + d\dfrac{K_i}{K_c}},$$

ce qui pour $K_c = \infty$ donnerait

$$K_r = \frac{d + 2\delta}{2\delta} K_i.$$

M. Vidmar admet que pour le fil rond, il n'y a contact direct que pour 60 pour cent de l'épaisseur du fil.

Nous verrons dans un exemple pratique calculé plus loin, que la conductibilité résultante K_r, d'un fil de cuivre d'un diamètre de 5,17 mm, isolé à 5,6 mm, est de $10{,}45 \times 10^{-3}\dfrac{w}{1^\circ - \text{cm}}$. La double

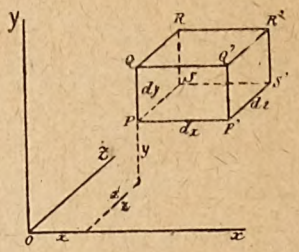


Fig. 4. — Etablissement des équations de Laplace et de Poisson

épaisseur 2δ de l'isolation étant de $5{,}6 - 5{,}17 = 0{,}43$ mm, on déduit de la formule (3) b pour la conductibilité de l'isolation

$$K_i = \frac{2\delta}{d + 2\delta}\frac{Kr}{0{,}6} = \frac{0{,}43}{5{,}6}\frac{10{,}45 \times 10^{-3}}{0{,}6} = 1{,}34 \times 10^{-3}\frac{w}{1^\circ - \text{cm}}.$$

M. Vidmar indique pour cette conductibilité une valeur de

$$1{,}2 \times 10^{-3}\frac{w}{1^\circ - \text{cm}};$$

la coïncidence avec la valeur donnée par cet auteur est largement suffisante.

Nous donnerons au chapitre III une liste des conductibilités des différentes matières employées dans la construction électrique, ainsi que les conductibilités résultantes de plusieurs combinaisons d'isolants.

2. *Conservation de la chaleur. Equations de Laplace et de Poisson.* — Considérons (fig. 4) un élément de volume, sous forme d'un parallélépipède élémentaire, dont un des sommets P a les coordonnées x, y et z et dont les trois arêtes ont pour longueur dx, dy et dz.

Digitized by Google

Supposons que dans le corps considéré on produise par unité de volume et par unité de temps, une quantité de chaleur w, qui peut être une variable, et être fonction de la température, des coordonnées et du temps. Désignons d'autre part par γ la chaleur spécifique de la matière et par δ son poids spécifique. Dans le parallélépipède élémentaire, nous avons à considérer trois quantités de chaleur distinctes : la différence entre les flux de chaleur qui entrent et les flux qui sortent par les six faces de l'élément, la chaleur qui est produite à l'intérieur de l'élément, et enfin la quantité de chaleur emmagasinée dans l'élément. La somme des deux premières doit, d'après le principe de conservation de l'énergie, être égale à la troisième.

Examinons d'abord le flux de chaleur qui traverse l'élément dans le sens des x positifs. La quantité de chaleur qui, pendant un temps infiniment court dt, pénètre dans l'élément par la face PQRS, de surface $dy\,dz$, et de température θ, a d'après la première des formules (2) la valeur

$$q_x = -\,\mathrm{K}_x \frac{\partial \theta}{\partial x} dydzdt.$$

Le flux de chaleur qui sort pendant le même temps dt par l'élément de surface P'Q'R'S', de température θ', a de même la valeur

$$q'_x = -\,\mathrm{K}_x \frac{\partial \theta'}{\partial x} dydzdt.$$

Mais la variation de la température dans le sens des x est par unité de longueur $\frac{\partial \theta}{\partial x}$; elle est donc sur la longueur dx de $\frac{\partial \theta}{\partial x} dx$, et il s'ensuit que θ' devient

$$\theta' = \theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx,$$

ce qui donne, pour le flux de chaleur sortant par l'élément de surface P'Q'R'S'

$$q'_x = -\,\mathrm{K}_x \frac{\partial}{\partial x}\left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx\right) dydzdt.$$

La quantité de chaleur, différence entre les deux flux q_x et q'_x, est emmagasinée pendant le temps dt dans le parallélépipède élémentaire ; elle est

$$q_x - q'_x = -\,\mathrm{K}_x \frac{\partial \theta}{\partial x} dydzdt + \mathrm{K}_x\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx\right) dydzdt,$$

ce qui est égal à

$$\mathrm{K}_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dxdydzdt.$$

Appliquons ce même raisonnement aux éléments de surface PP'SS'

Digitized by Google

et QQ'R'R, et cherchons la différence entre le flux de chaleur qui entre dans le parallélépipède élémentaire dans la direction des y positifs, et celui qui en sort; cette différence constitue une deuxième quantité de chaleur emmagasinée pendant le temps dt dans le parallélépipède élémentaire. Sa valeur est

$$K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} dy dx dz dt.$$

On obtient de même, pour la quantité de chaleur emmagasinée provenant de la différence des flux de chaleur dirigés dans le sens des z

$$K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dz dx dy dt.$$

La quantité de chaleur, produite dans l'élément même, a la valeur

$$w dx dy dz dt,$$

de sorte que la quantité totale de chaleur emmagasinée dans l'élément, pendant le temps dt, devient

$$\left(K_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + w\right) dx dy dz dt. \tag{1}$$

Cette quantité de chaleur augmente la température de la masse de l'élément. La variation de la température par unité de temps est $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ et devient donc après le temps dt

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} dt.$$

Mais il faut γ g-cal pour augmenter de 1°C l'unité de masse de la matière du corps considéré, et $\gamma\delta$ g-cal pour l'unité de volume; la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de $\frac{\partial \theta}{\partial t} dt$ la température du volume du parallélépipède devient par conséquent

$$\gamma\delta \frac{\partial \theta}{\partial t} dt dx dy dz. \tag{2}$$

La quantité de chaleur représentée par (1) doit donc être égale à celle représentée par (2), ce qui donne

$$K_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + w = \gamma\delta \frac{\partial \theta}{\partial t}. \tag{3}$$

Lorsqu'un corps est soumis à un échauffement, soit que l'on y introduise de la chaleur par ses surfaces, soit que la chaleur soit produite dans le corps même, la température en chaque point du corps satisfait à cette équation générale. La température se rapproche, d'après la loi exprimée par cette équation, d'une valeur finale qu'elle atteint après un temps qui est théoriquement infiniment long. Le régime auquel le corps est soumis aussi longtemps que la température finale en chaque

Digitized by Google

point du corps n'est pas atteinte, s'appelle « régime variable », et on désigne par « régime stationnaire » celui qui correspond à l'état final, où la température est partout constante. Ce dernier régime satisfait à la condition

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0,$$

ce qui ramène l'équation (3) à

$$K_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + w = 0. \tag{4}$$

Dans la présente étude, nous examinerons uniquement le régime stationnaire.

La quantité de chaleur w, produite par unité de volume et par unité de temps peut être due à des réactions chimiques, ou peut provenir dans une machine électrique de pertes par effet Joule ou de pertes magnétiques. Lorsqu'il n'y a pas de production de chaleur dans le corps même, la quantité w est nulle ; l'équation se simplifie et devient

$$K_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0. \tag{4a}$$

Si l'on peut admettre que la répartition de la température est indépendante de l'une des directions, de z par exemple, on a

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0,$$

et par suite, en supposant w différent de zéro

$$K_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + w = 0. \tag{5}$$

La relation (4*a*) est l'équation de Laplace, et la relation (4) l'équation de Poisson.

3. *Conductibilité extérieure et conditions à la surface.* — Les relations (2) du paragraphe 1 et (3) du paragraphe précédent doivent être vérifiées, en chaque point du corps, par la fonction qui donne la valeur de la température, mais elles ne sont pas suffisantes, car il faut encore tenir compte des conditions de refroidissement par convection et par rayonnement. Nous avons déjà dit que nous admettions la loi de Newton, qui exprime que la quantité de chaleur émise par un élément de surface est proportionnelle au temps, à la surface d'émission et à la différence entre la température θ_s de l'élément de surface, et celle θ_m du milieu. Son expression analytique est

$$q_e = h(\theta_s - \theta_m)st. \tag{1}$$

Le coefficient h, appelé « coefficient de conductibilité extérieure » ou « coefficient d'émission de chaleur », tient compte à la fois de la con-

Digitized by Google

vection et du rayonnement ; sa valeur dépend en chaque point de l'état et de la nature des surfaces des corps considérés, ainsi que de la vitesse de l'air de refroidissement. Le coefficient h n'est pas une constante absolue, car nous savons qu'il varie lui-même avec la température. Nous admettons toutefois dans la suite que h est une constante dans les limites de température que nous rencontrons. Le coefficient h s'exprime en $\frac{\text{g-cal}}{s - 1^\circ - \text{cm}^2}$, ou en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$.

La quantité de chaleur q_e, émise par la surface, est amenée de l'intérieur du corps ; pour un élément de surface, sa valeur est donc aussi donnée par la formule (1) du paragraphe 1.

Considérons une surface cylindrique ayant pour contour de la section droite la courbe c (fig. 5), et choisissons un système d'axes $Ox'y'$ dans

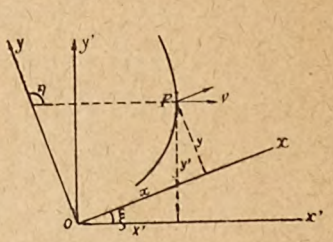


Fig. 5.

le plan de la courbe et tel que Ox' est la direction de la normale extérieure P_v à l'élément de surface considéré ; soit ξ l'angle entre les directions positives Ox' et Ox. On a pour le flux de chaleur l'expression

$$-K\frac{\partial\theta}{\partial x'}st.$$

Nous admettons que dans le plan Oxy, la conductibilité soit constante dans toutes les directions, et que sa valeur soit égale à K.

Nous tirons de la figure 5 les formules de changement de coordonnées :

$$x = y' \sin\xi + x' \cos\xi,$$
$$y = y' \cos\xi - x' \sin\xi.$$

Cherchons l'expression de $\frac{\partial\theta}{\partial x'}$ en fonction de $\frac{\partial\theta}{\partial x}$ et $\frac{\partial\theta}{\partial y}$; nous avons identiquement

$$\frac{\partial\theta}{\partial x'} = \frac{\partial\theta}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial x'} + \frac{\partial\theta}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial x'}.$$

Mais on a

$$\frac{\partial x}{\partial x'} = \cos\xi \qquad \text{et} \qquad \frac{\partial y}{\partial x'} = -\sin\xi,$$

d'où il vient

Digitized by Google

$$\frac{\partial \theta}{\partial x'} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \cos \xi - \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin \xi.$$

Le flux de chaleur sortant par l'élément de surface s pendant le temps t est donc

$$- K \frac{\partial \theta}{\partial x'} st = - K \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos \xi - \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin \xi \right) st.$$

En désignant par η l'angle que la direction de la normale, extérieure à l'élément de surface, forme avec la direction positive des y, on a

$$\xi = \eta - \frac{\pi}{2}$$

ou encore

$$\sin \xi = - \cos \eta,$$

ce qui donne finalement pour le flux de chaleur, la valeur

$$(2) \qquad - K \frac{\partial \theta}{\partial x'} st = - K \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos \xi + \frac{\partial \theta}{\partial y} \cos \eta \right) st.$$

Le flux de chaleur suivant une direction quelconque est, pour chaque point de la surface, égal à la somme des flux de chaleur suivant deux directions rectangulaires quelconques, multipliés respectivement par le cosinus de l'angle que forme la normale extérieure à la surface avec la direction positive de chacun de ces axes.

En exprimant que la quantité de chaleur émise par un élément de surface est égale à la quantité reçue de l'intérieur du corps, on obtient de (1) et (2) la condition

$$(3) \qquad - K \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos \xi + \frac{\partial \theta}{\partial y} \cos \eta \right)_s = h(\theta - \theta_m)_s,$$

qui doit être satisfaite pour tout point de la surface.

Dans le cas envisagé, le problème s'est simplifié parce que la surface est un cylindre et que, par conséquent, chaque normale extérieure est perpendiculaire à l'axe Oz. Mais cette propriété est générale et pourrait être étendue à une surface quelconque, à condition de faire intervenir trois axes de coordonnées, et les angles qu'ils forment avec la normale extérieure.

Un exemple pratique d'une surface cylindrique où la conductibilité calorifique est la même dans toutes les directions du plan Oxy, et où la formule (3) trouve son application, est celui des dents des machines électriques (fig. 6). Dans ce cas, la conductibilité thermique dans le sens de l'axe des z est différente de celle du plan Oxy.

Nous n'examinons pas le cas général d'une surface quelconque avec conductibilités différentes dans le sens des trois axes. Pour que le problème comporte des solutions simples, il est nécessaire que la conductibilité soit constante dans un plan Oxy, par exemple, mais elle peut

Digitized by Google

être différente, comme dans le cas que nous venons de citer, dans une direction Oz perpendiculaire à ce plan ; il faut, en outre, que le volume

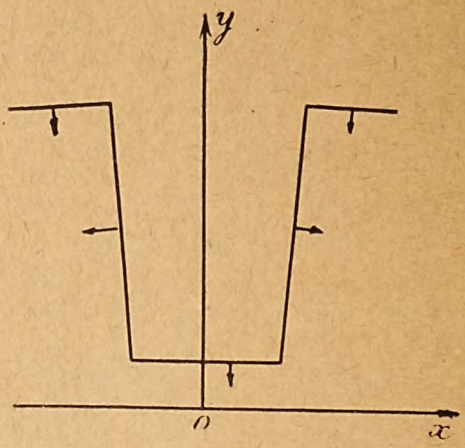


Fig. 6. — Application aux dents d'une machine.

considéré soit un cylindre d'axe Oz, et que ce cylindre soit limité par des sections droites.

Examinons le cas très simple d'un parallélépipède rectangle, dont

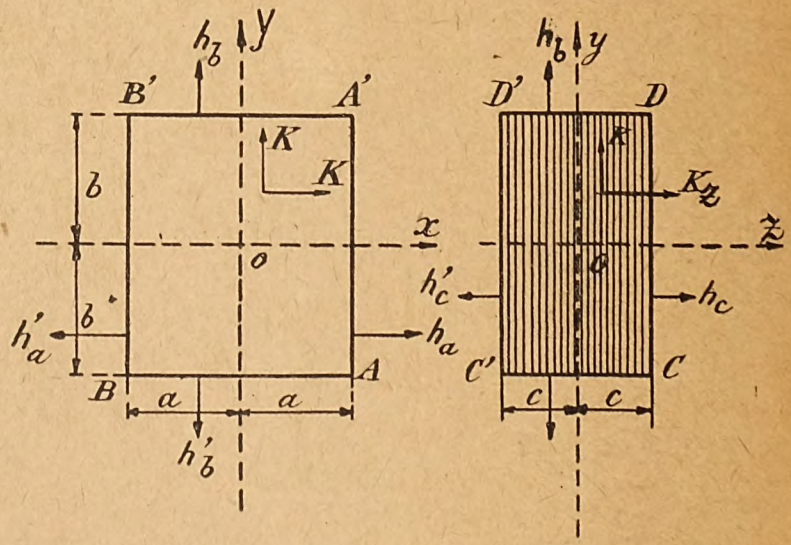


Fig. 7.

les arêtes ont pour longueur $2a$, $2b$, $2c$, l'origine des coordonnées étant prise au centre du parallélépipède (fig. 7). Soient h_a, $\theta_{m,a}$, h'_a, $\theta_{m,-a}$, h_b, $\theta_{m,b}$, etc..., les valeurs respectives des coefficients d'émission et de

Digitized by Google

la température du milieu ambiant, supposés constants sur chacune des faces AA′, BB′, B′A′, etc.

Pour la face AA′, par exemple, le cosinus de l'angle entre la normale extérieure et la direction positive des x a pour valeur 1 ; pour la face BB′, l'angle ξ a pour valeur π et son cosinus est donc égal à -1.

On obtient par conséquent pour tous les points de la face AA′

$$(4a) \quad -K\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=+a}\cos\xi = -K\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=+a} = h_a(\theta_{x=+a} - \theta_{m,a}),$$

et pour la face BB′

$$(4b) \quad -K\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=-a}\cos\xi = +K\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=-a} = h'_a(\theta_{x=-a} - \theta_{m,-a}).$$

De même pour les faces A′B′ et AB

$$(5a) \quad -K\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)_{y=b} = h_b(\theta_{y=-b} - \theta_{m,b}),$$

$$(5b) \quad +K\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)_{y=-b} = h'_b(\theta_{y=-b} - \theta_{m,-b}),$$

et pour les faces CD et C′D′,

$$(6a) \quad -K_z\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)_{z=c} = h_c(\theta_{z=c} - \theta_{m,c}),$$

$$(6b) \quad +K_z\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)_{z=-c} = h'_c(\theta_{z=-c} - \theta_{m,-c}).$$

Mais d'autres conditions aux limites sont encore à considérer dans certains cas. Un corps A peut perdre de la chaleur par contact avec un autre corps B, ou un corps A peut être soumis à des conditions de pertes et avoir des constantes de refroidissement différentes d'un corps B, les conductibilités thermiques K_A et K_B de A et B pouvant également ne pas être les mêmes. Dans ce cas, on exprime que la chaleur perdue par le corps A, en un point de la surface de contact des deux corps, est égale à la chaleur absorbée par le corps B en ce même point. On a donc, en admettant que la chaleur s'écoule de A dans le sens positif des x, pour tout point de la surface de contact considérée

$$(7) \quad -K_A\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_A = -K_B\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_B,$$

ou encore

$$(7a) \quad \frac{\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_B}{\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_A} = \frac{K_A}{K_B}.$$

Des relations analogues sont valables pour les autres directions.

La relation (7) a exprimé qu'à l'endroit du contact, les tangentes aux

Digitized by Google

courbes des températures, sont pour les deux corps dans le rapport inverse des conductibilités ; la figure 3 est en quelque sorte la représentation graphique de l'expression (7).

Pour deux corps en contact tels que A et B, il faut tenir compte de plus de la deuxième condition aux limites, exprimant que les températures sont les mêmes en chaque point de la surface de contact, ce qui donne

$$\theta_A = \theta_B, \tag{8}$$

pour tout point de la surface de contact.

Les explications précédentes suffisent pour déterminer les conditions aux limites dans tous les cas. Ainsi, lorsqu'une surface est recouverte d'un isolant calorifique parfait, on écrit que l'émission de chaleur par cette surface est nulle, autrement dit que $h = 0$. Ceci entraîne par l'emploi de la formule (4) l'égalité suivante, vérifiée en chaque point de la surface calorifugée

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \tag{9}$$

si cette surface est perpendiculaire à l'axe des x, par exemple.

De même que l'on vient de considérer le cas de $h = 0$, on peut envisager celui de $h = \infty$. Pour trouver la signification de cette valeur, écrivons la relation $(4)a$ par exemple, en la divisant par h_a

$$-\frac{K}{h_a}\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{x=a} = (\theta_{x=a} - \theta_{m.a}),$$

ce qui donne, pour $h_a = \infty$

$$\theta_{x=a} = \theta_{m.a}. \tag{10}$$

La température de chaque point de la surface est la même que celle du milieu ambiant. Nous examinerons un cas de ce genre, étudié par Fourier, qui suppose un corps plongé dans la glace fondante, chaque point de la surface du corps étant, dans ce cas, à la température zéro.

Nous ajoutons ici une remarque importante concernant les valeurs à admettre pour le coefficient d'émission de chaleur h. Soit un corps C de conductibilité thermique K, entouré d'un isolant hétérogène, de conductibilité thermique résultante K_r et d'une épaisseur e assez mince pour que l'on puisse admettre que la chaleur traverse l'isolant dans le sens de son épaisseur, et qu'il ne soit, par conséquent, pas nécessaire de tenir compte de la propagation de la chaleur dans l'isolant vers d'autres directions. Soit, d'autre part, θ_m la température de l'air de refroidissement et h le coefficient d'émission de chaleur du point considéré de la surface de l'isolant, pour les conditions données de la nature de la surface, de la température et de la vitesse de l'air, et θ_s la

Digitized by Google

température de ce point. Si on désigne par a l'abscisse du point considéré à la surface du corps, on a d'après ce qui précède

$$-K\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=a} = K_r \frac{\theta_{x=a} - \theta_s}{e} = h(\theta_s - \theta_m).$$

On obtient pour θ la valeur, tirée du deuxième et du troisième membre

$$\theta_s = \frac{K_r \theta_{x=a} + eh\theta_m}{K_r + eh},$$

ce qui donne, en introduisant cette expression dans le troisième membre, et en combinant celui-ci avec le premier, tous calculs faits

$$(11) \qquad -K\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=a} = \frac{hKr}{K_r + eh}(\theta_{x=a} - \theta_m) = h_r(\theta_{x=a} - \theta_m).$$

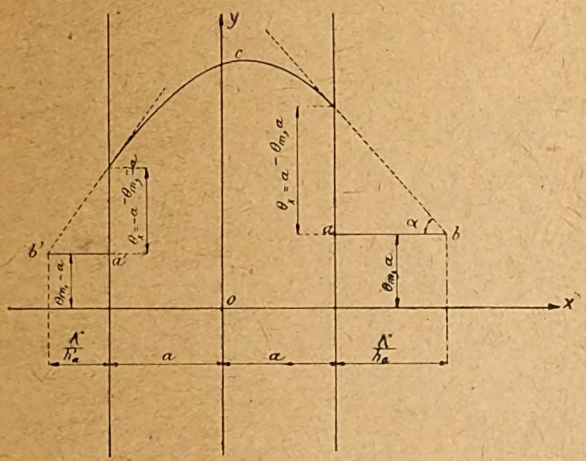


Fig. 8. — Construction de la courbe de température au moyen de tangentes aux points extrêmes.

La loi d'émission de chaleur exprimée par la relation (4)a ne se trouve donc pas modifiée du fait de la présence de l'isolant, sous réserve de l'hypothèse admise d'un isolant suffisamment mince, et les calculs peuvent être conduits comme si l'isolant n'existait pas. Il suffit de remplacer la valeur de h à la surface par le nouveau coefficient d'émission de chaleur résultant h_r donné par la relation

$$(12) \qquad h_r = \frac{hK_r}{K_r + eh}.$$

Cette formule a déjà été donnée par Fourier.

Nous terminons ce paragraphe en indiquant une propriété remarquable, signalée par M. F. Emde (1) des courbes de représentation de la température. Soit c (fig. 8), la courbe donnant la température d'une

(1) V. bibliographie.

Digitized by Google

section quelconque, parallèle par exemple au plan xy, du parallélépipède de la figure 7. Prolongeons la tangente à la courbe c, au point $x = a$, jusqu'à son intersection avec une droite, distante de la valeur de la température ambiante $\theta_{m,a}$ de la droite ox représentant la température zéro. On a

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\theta_{x=a} - \theta_{m,a}}{ab},$$

ou

$$ab = \frac{\theta_{x=a} - \theta_{m,a}}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Mais on a d'autre part de (4)a

$$\mathrm{K} \operatorname{tg} \alpha = h_a(\theta_{x=a} - \theta_{m,a}),$$

ce qui donne pour la longueur ab la valeur

$$ab = \frac{\mathrm{K}}{h_a} \text{ cm}$$

et de même pour $a'b'$

$$a'b' = \frac{\mathrm{K}}{h_a'} \text{ cm}.$$

Cette propriété facilite dans une grande mesure le tracé des courbes de température. On porte sur une ligne ab, parallèle à ox, la longueur $ab = \frac{\mathrm{K}}{h}$; une droite, tracée de b vers le point représentant la température à la surface, est une tangente à la courbe de température.

III — Valeurs pratiques des constantes thermiques.

Nous avons dit dans l'introduction qu'au cours de nos développements mathématiques nous ne perdrons jamais de vue la réalité pratique; mais pour pouvoir appliquer à des problèmes concrets la théorie développée dans le chapitre précédent, nous devons connaître les valeurs pratiques des constantes thermiques que nous venons de définir. Nous avons relevé les valeurs de ces constantes, publiées par différents auteurs et donnons ci-après, avec l'indication des sources, les valeurs des conductibilités thermiques des matières employées dans la construction électrotechnique, ainsi que celles des coefficients d'émission de chaleur, en y ajoutant les valeurs tirées de nos propres recherches expérimentales. En ce qui concerne les conductibilités on remarque qu'il existe, pour certaines matières isolantes, une grande diversité entre les valeurs indiquées par les différents auteurs. Cela provient, en premier lieu, du fait que des matières, dénommées de

Digitized by Google

même façon par deux auteurs différents, ne sont en réalité pas les mêmes, ou encore de ce que l'on ne distingue pas la matière proprement dite de la matière employée industriellement, qui renferme souvent de minces pellicules d'air. La conductibilité de la micanite par exemple, qui compose les tubes isolants des machines à haute tension, a été mesurée au Laboratoire Central d'électricité à Paris; les valeurs trouvées variaient entre 3,05 et $1{,}3 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$, ces différences provenant de la plus ou moins bonne compression des isolants composants de la micanite.

Les recherches expérimentales, entreprises par l'auteur, ont été faites sur des bobines fabriquées et isolées industriellement ; les mêmes essais ont permis de déterminer à la fois la conductibilité thermique de la matière isolante entourant le cuivre de la bobine, et le coefficient d'émission de chaleur, sous des conditions variées de ventilation.

4. — *Conductibilité thermique* K *des matières employées dans la construction électrotechnique.*

TABLEAU I

Conductibilité des tôles en $\frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

I. Langmuir. Tôles de transformateurs à 4 % de Si,
dans le sens de la tôle 0,32

L. Ott. Tôles de 0,5 mm d'épaisseur, isolées au papier,
dans le sens de la tôle 0,57
dans le sens transversal . . . . . 0,0044 à 0,0117

T. Spooner	Sens de la tôle	Sens transversal
Tôles ordinaires, à faible teneur de Si .	0,473	0,0055
Tôles à forte teneur de Si.	0,197	0,0051

E. Roth. Tôles de transformateurs, isolées au papier,
dans le sens transversal 0,005

T. S. Taylor.	Sens transversal
Tôles ordinaires (0,44 mm), non émaillées.	0,0164
Tôles ordinaires (0,44 mm), émaillées.	0,0126
Tôles au silicium (0,36 mm), non émaillées	0,0095
Tôles au silicium (0,36 mm), émaillées	0,0106

Digitized by Google

T. S. Taylor. — Variation de la conductibilité K *dans le sens transversal avec la pression p de serrage.*

Tôles ordinaires (0,44 mm) à des températures variant de 80 à 100°C		Tôles au silicium (0,36 mm) à des températures variant de 70 à 90°C	
$K \frac{w}{1^\circ - cm}$	p Kg : cm²	$K \frac{w}{1^\circ - cm}$	p Kg : cm²
—	—	—	—
0,0042	0,057	0,0027	0,058
0,0083	1,81	0,0052	1,06
0,0092	3,81	0,0060	2,30
0,0096	6,04	0,0064	4,30
0,0106	8,81	0,0069	7,12
		0,0072	9,22

TABLEAU II

Conductibilité en $\frac{w}{1^\circ - cm}$ *d'autres métaux que les tôles.*

Matière	Source		
—	Tables annuelles	Langmuir	Hutte
	—	—	—
Cuivre électrolytique	3,78	3,84	3,88
Cuivre commercial	—	3,50	3,48
Aluminium	2,05	—	2,02
Fer pur	—	0,67	0,58 à 0 70
Acier doux	—	0,45	0,40 à 0,52
Acier dureté du verre	—	—	0,25
Fonte	—	0,40	0,46
Laiton	—	1,30	0,64 à 1,28
Etain	0,647	—	0,64
Zinc	—	—	1,10
Plomb	0,344 à 36° C	—	0,30
Platine	0,692	—	0,70
Argent	—	—	4,17
Nickel	0,584	—	0,58
Maillechort à 30 % Ni	—	0,28	—
Constantan 60 % Cu, 40 % Ni	—	0,29	0,23

Digitized by Google

TABLEAU III

Matières isolantes.

Les valeurs données par ce tableau sont à multiplier par 10^{-3} pour obtenir les conductibilités en $\frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

Matière	Source					
—	Symons et Walker	T. S. Taylor	R. Pohl	Tables annuelles	I. Langmuir	Hutte
	—	—	—	—	—	—
Carton lustré (presspahn) non traité	1,7	—	0,7 à 1,9 (1)	—	—	—
Carton huilé	—	2,27	—	—	—	—
Carton	—	—	—	—	—	1,85
Fullerboard	—	1,74	—	—	—	—
Fullerboard verni.	1,4	—	—	—	—	—
Papier parchemin.	—	1,82	—	—	1,3	—
Papier parchemin paraffiné	—	2,02	—	—	—	—
Amiante (feuilles et plaques)	2,17	1,65	1,6	—	2,5	1,8
Micanite (2)	1,0 à 1,2	2,3 à 2,6	—	—	0,81 à 1,0	—
Ruban mica	—	—	0,43 (1)	—	—	—
Ruban caoutchouté	—	—	—	—	4,3	—
Toile de lin	—	—	—	0,70	—	—
Toile empirе	2,5	—	—	—	—	—
Ruban de toile vernie	1,5	—	—	—	—	—
Batiste vernie	—	—	—	—	2,5	—
Coton	—	—	—	—	0,30 à 0,46	—
Soie	—	—	—	0,42 à 0,46	—	—
Porcelaine	—	—	—	—	10,0	—
Paraffine	1,96 à 2,53	—	—	—	2,6	—
Ebonite	—	—	—	—	1,8	—
Guttapercha	—	—	—	—	2,0	—
Caoutchouc	—	—	—	—	1,6	1,97 à 3,48
Bois, parallèle aux fibres (3)	—	—	—	3,5 à 4,2	—	—
Bois, perpendiculaire aux fibres (3)	—	—	—	1,5 à 2,0	1,6	—
Liège	—	—	—	—	—	3,01
Feutre	—	—	—	—	—	0,35

(1) Conductibilité résultante de l'isolant et de l'air emprisonné.

(2) Les valeurs trouvées par M. P. JANET varient entre 1,3 et 3,0 $\frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

(3) Valeurs moyennes des différentes sortes de bois.

Digitized by Google

Liquides.

Huile pour transformateurs, d'après VIDMAR, $1{,}65 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

Huile de graissage (HUTTE) $1{,}16 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$

Eau (HUTTE) $5{,}8 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

Gaz (d'après R. Pohl), en $\frac{w}{1^\circ \quad \text{cm}}$ *à* 0° C *et* 760 mm Hg.

Air	$0{,}22 \times 10^{-3}$	Ammoniaque	$0{,}191 \times 10^{-3}$
Hydrogène	$1{,}17 \times 10^{-3}$	Helium	$1{,}413 \times 10^{-3}$
Azote	$0{,}237 \times 10^{-3}$	Méthane	$0{,}284 \times 10^{-3}$
Acide carbonique	$0{,}140 \times 10^{-3}$		

TABLEAU IV

Conductibilités thermiques d'isolations industrielles composées.

en $\frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

a. — Valeurs données par H. SYMONS et M. WALKER.

6 couches de toile vernie de 0,0175 cm fortement serrées	$2{,}5 \times 10^{-3}$
2 feuilles de presspahn non traité, de 0,16 cm chacune	$1{,}7 \times 10^{-3}$
Couches successives de 0,018 cm de toile empire et de 0,075 cm de mica, fortement serrées ensemble	$2{,}1 \times 10^{-3}$

b. — Valeur indiquée par R. B. WILLIAMSON.

Isolation pour 11 000 volts, composée de mica et de toile empire.	$1{,}26 \times 10^{-3}$

c. — Valeurs déterminées par l'auteur par des expériences faites dans les ateliers de la Société alsacienne de Constructions mécaniques.

Composition de la gaine isolante	Conductibilité
1 couche tresse gommelaquée	$0{,}24$ à $0{,}36 \times 10^{-3}$
1 couche tresse gommelaquée, plus une couche mica-tresse	$0{,}31$ à $0{,}36 \times 10^{-3}$
1 couche tresse gommelaquée, plus 1 couche ruban sterling, plus 1 couche vernis	$1{,}1$ à $1{,}5 \times 10^{-3}$
1 couche tresse gommelaquée, plus 3 couches de ruban sterling, plus 3 couches de vernis	$1{,}6$ à $2{,}0 \times 10^{-3}$
1 couche tresse gommelaquée, plus 4 couches de ruban sterling, plus 4 couches de vernis	$2{,}1$ à $2{,}9 \times 10^{-3}$
1 couche tresse gommelaquée, plus 1 mm de papier	$0{,}63$ à $0{,}73 \times 10^{-3}$
1 couche tresse gommelaquée, plus 2 mm de papier	$0{,}83$ à $0{,}91 \times 10^{-3}$
2 mm de micanite	$1{,}2$ à $1{,}7 \times 10^{-3}$
2 mm de carton lustré (presspahn)	$1{,}6$ à $2{,}75 \times 10^{-3}$
0,5 mm d'amiante	$0{,}57$ à $0{,}74 \times 10^{-3}$

Digitized by Google

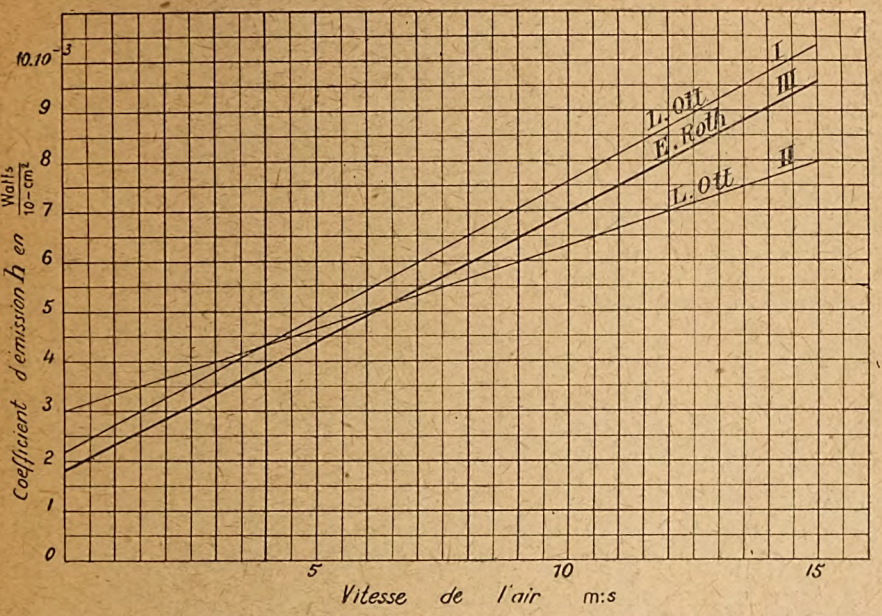


Fig. 9 — Coefficient d'émission de chaleur pour de faibles vitesses de l'air de refroidissement.

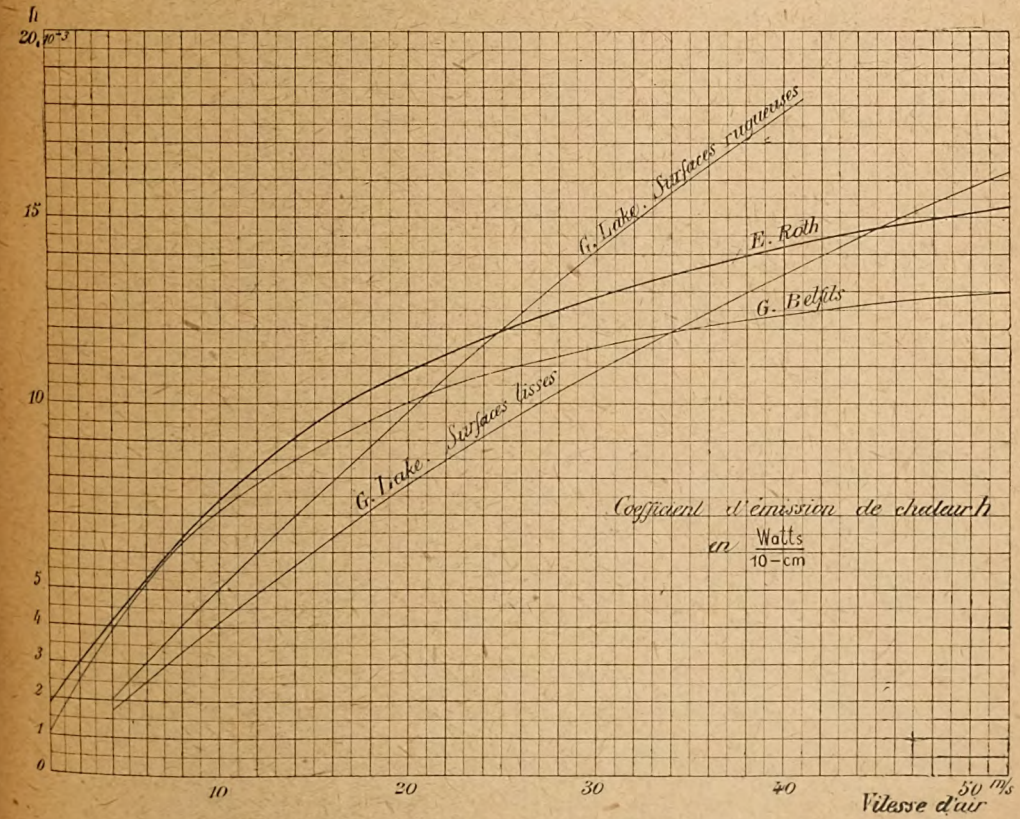


Fig. 10.

Digitized by Google

5. — *Coefficients d'émission de chaleur.*

Ces coefficients ont été déterminés par différents auteurs sur des dispositifs reproduisant un certain élément d'une machine électrique, permettant de mesurer les échauffements de la surface et de l'air refroidissant, la quantité de chaleur enlevée, ainsi que la vitesse de l'air,

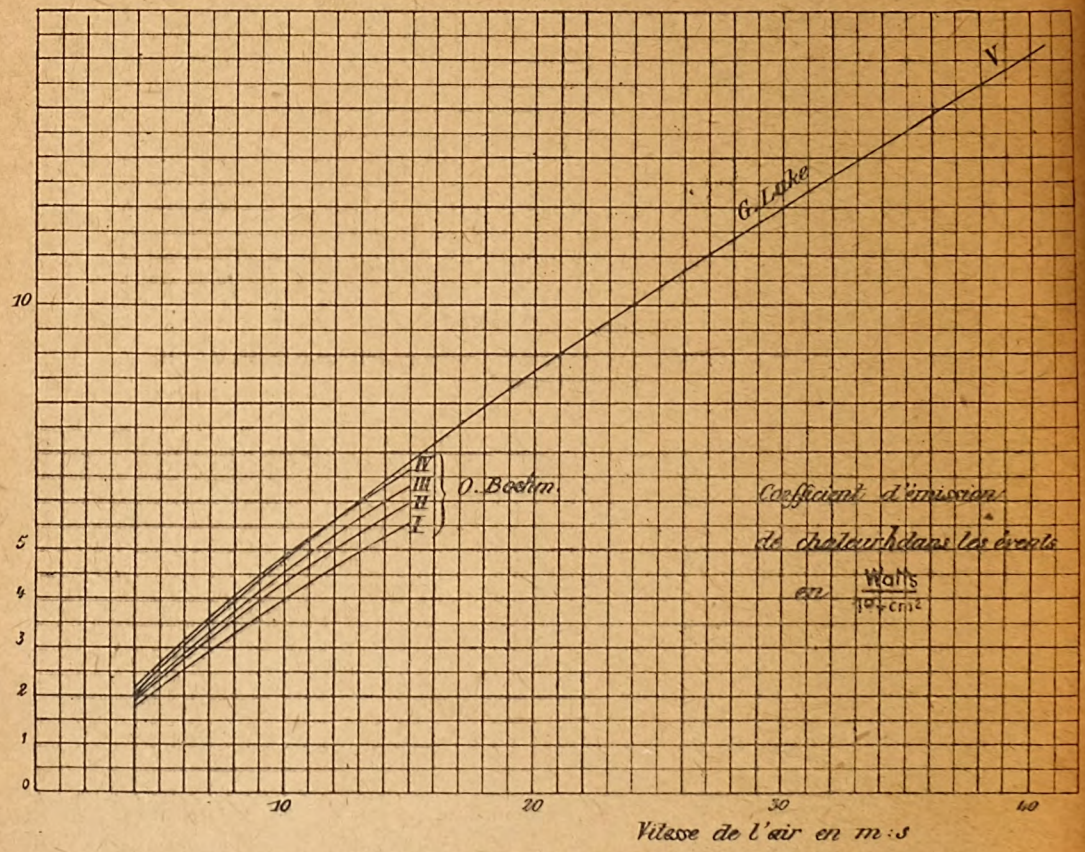


Fig. 11. — Coefficien d'émission de chaleur dans les évents.

en tenant compte également de l'état de la surface rayonnante. Nous donnons ci-après les résultats de travaux principaux concernant ce sujet, en renvoyant le lecteur pour plus d'amples détails aux travaux expérimentaux mentionnés dans la bibliographie, et y ajoutons les résultats de nos propres recherches, ainsi que de celles de M. G. Belfils, ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécaniques.

Les figures 9, 10 et 11 donnent les coefficients d'émission de chaleur h, exprimés en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$ en fonction de la vitesse de l'air de

Digitized by Google

refroidissement. Dans la figure 9 on a représenté trois courbes, pour de faibles vitesses d'air; les deux premières ont été données par M. L. Ott, et se rapportent, la première à des surfaces de tôles légèrement vernies, la seconde à des surfaces de tôles fortement vernies. La courbe III est la moyenne d'une grande série d'expériences faites sur des bobines à surfaces lisses, qui ont été isolées de façon industrielle; cette dernière courbe a été prolongée sur la courbe I de la figure 10 et amène à des résultats concordant bien avec ceux de la pratique. La courbe II de M. G. Belfils a été relevée sur un tube de cuivre, chauffé par une bobine, et à travers lequel on a fait passer un courant d'air de débit connu. Nous y ajoutons encore deux courbes, III et IV, données par M. G. Luke, dont l'une se rapporte à des surfaces rugueuses et l'autre à des surfaces lisses.

La figure 11, permet de se rendre compte de la valeur du coefficient d'émission de chaleur h dans les évents des machines électriques; nous y reproduisons la série des courbes I à IV publiées par M. O. Boehm, donnant les valeurs de h pour des évents de largeur variant entre 4 et 16 mm, ainsi que la courbe V de M. G. Luke, pour des évents de largeur de 10 à 12 mm.

Les valeurs données par ces courbes sont suffisantes pour toutes les applications pratiques.

IV

Problèmes a une seule dimension.

Dans les problèmes de la théorie analytique de la chaleur en général, et en particulier dans ses applications aux machines électriques, il faudrait en réalité toujours tenir compte des trois dimensions, mais il est quelquefois possible, sous certaines hypothèses, de ne considérer qu'une ou deux dimensions; il incombe au constructeur de la machine d'examiner de combien les hypothèses admises auront pu l'écarter de la vérité. Dans ce travail nous n'étudierons que des problèmes pouvant se réduire à une ou deux dimensions, et consacrons le présent chapitre à quelques problèmes à une dimension, dont presque tous ont un intérêt pratique immédiat.

6. — *Problème du Mur.* — Nous commençons par l'étude d'un problème très simple, qui, tout en ne répondant pas directement à un cas pratique, nous permettra d'appliquer les différentes lois énoncées plus haut, et nous facilitera dans la suite certains développements mathé-

Digitized by Google

matiques. Considérons un mur illimité dans deux dimensions, d'une épaisseur $2e$ (fig. 12) ; tous les points d'un plan parallèle aux faces du mur auront la même température, de sorte qu'il s'agit d'un problème à une seule dimension. Les mêmes conditions pourraient être réalisées s'il était possible d'isoler d'une façon parfaite les deux

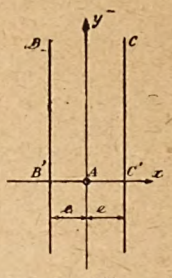


Fig. 12. — Problème du mur.

faces B'B et A'A d'une barre très longue, car aucune chaleur ne s'écoulerait dans le sens des y (fig. 12 *a*).

Nous admettons que le mur ou la barre sont soumis à une perte de w watts par unité de volume; soient d'autre part K la conductibilité

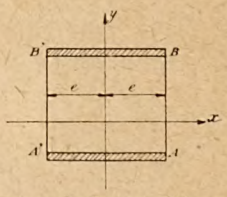


Fig. 12 *a*. — Barre infinie isolée sur deux faces.

de la matière et h le coefficient d'émission de chaleur des faces qui rayonnent vers un milieu de température θ_a ; l'équation de Poisson devient :

$$K \frac{d^2\theta}{dx^2} + w = 0,$$

ou

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = -\beta,$$

avec

$$\beta = \frac{w}{K}.$$

Ceci donne directement

$$\frac{d\theta}{dx} = -\beta x + C', \tag{1}$$

et

$$\theta = -\frac{\beta}{2} x^2 + C'x + C \tag{2}$$

Digitized by Google

On voit de suite que $C' = o$, car la fonction θ doit être paire en x. Pour déterminer C on tient compte de la condition à la surface, en se servant des conditions (4) du paragraphe 3.

$$-K\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=e} = h(\theta_{x=e} - \theta_a).$$

Cela donne, en remplaçant en (1) et (2) x par e

$$\frac{K}{h}\beta e = -\frac{\beta}{2}e^2 + C - \theta_a,$$

$$C = \frac{\beta}{2}e^2 + \frac{K}{h}\beta e + \theta_a.$$

On obtient donc finalement pour la température θ d'un plan parallèle aux faces du mur, à la distance x de l'axe

$$\theta = -\frac{\beta}{2}x^2 + \beta e\left(\frac{e}{2} + \frac{K}{h}\right) + \theta_a. \tag{3}$$

La température suit dans ce cas une loi parabolique.

Il est facile de déterminer θ lorsque les conditions de refroidissement sont dissymétriques, que cela provienne de ce que les températures du milieu, ou les coefficients d'émission de chaleur, ou les deux, ne soient pas les mêmes pour les deux faces du mur; nous n'insisterons toutefois pas là-dessus, car ce sont des calculs qui peuvent se faire aisément, mais qui n'ont pas un grand intérêt pratique. Nous aurons du reste l'occasion de revenir plus loin au cas du mur.

7. — *La répartition de la température dans le cuivre du stator des machines à courant alternatif.* — Dans le cas de corps à faible section, des fils par exemple, soumis à l'échauffement, il est permis d'admettre que la température est la même dans chaque point d'une section droite. Dans cette hypothèse, la température varie uniquement dans le sens de la longueur du fil et la recherche de la valeur de la température est de ce fait un problème à une seule dimension. Par exemple, l'étude de l'échauffement d'un fil de fusible, traitée par plusieurs auteurs, constitue un problème de ce genre (1), mais on peut aussi faire usage de cette hypothèse pour le calcul de l'échauffement du cuivre des machines électriques. Elle peut être justifiée dans le cas des dispositions des figures 2*a* et 2*d*, à cause de la très grande conductibilité du cuivre, mais doit être appliquée avec prudence dans les cas des figures 2*c* et tout particulièrement 2*b*. Lorsqu'il s'agit de bobines inductrices, d'une section un peu importante, cette hypothèse est complètement en défaut, car, comme nous le verrons plus loin, de grandes

(1) V. Bibliographie.

Digitized by Google

différences de température peuvent régner entre un point à l'intérieur de la bobine et un point à la surface.

Le problème de la répartition de la température du cuivre sur la longueur du stator d'une machine à courant alternatif est un des plus importants dans l'étude des machines électriques, et a été traité par plusieurs auteurs; tous ont admis l'hypothèse d'une température constante du cuivre sur toute la section de l'encoche. Cette hypothèse est évidemment nécessaire pour réduire ce problème à un problème à une dimension, mais elle n'est pas suffisante; le cuivre ne rayonne en effet pas pour lui seul, car il est logé dans le fer et il y a échange de chaleur entre fer et cuivre; il faut donc faire intervenir dans le calcul les conditions de refroidissement du fer.

Différentes hypothèses sont possibles. La première, la plus simple, admet que la température du cuivre dans l'encoche et celle du fer entourant l'encoche sont les mêmes, en d'autres termes qu'il n'y a aucun échange de chaleur entre cuivre et fer. Dans cette hypothèse le cuivre n'est refroidi que dans les évents et par les parties frontales [1].

Une deuxième hypothèse, également simple, suppose connue la température du fer, sans faire intervenir les conditions de refroidissement du fer [2]. Cette hypothèse a quelque chose d'arbitraire de ce fait.

Une troisième hypothèse, celle qui se rapproche le plus de la vérité, tient compte de toutes les surfaces rayonnantes; elle admet seulement que la conductibilité du fer dans le plan des tôles est infiniment grande par rapport à la conductibilité tranversale, en d'autres termes que la température des tôles est la même dans tous les points d'un même plan perpendiculaire à l'axe de la machine [3].

Nous allons établir les calculs basés sur la première et la dernière hypothèse (V. fig. 13).

α. *On admet qu'il n'y a aucun échange de chaleur entre fer et cuivre* (fig. 13*a*). Nous introduisons les notations suivantes : soient d'abord :

$2c$ la largeur d'un paquet de tôles en cm ;

$2c'$ la largeur d'un évent, en cm ;

---

(1) A notre connaissance le problème de l'échauffement du cuivre des stators des machines électriques a été traité pour la première fois par un ingénieur de la Société alsacienne de Constructions mécaniques à Belfort, M. de Pfahler. Son travail qui est basé sur cette hypothèse simple, a été imprimé en décembre 1908 et a été englobé dans la description d'un alternateur pour lequel la Société alsacienne a soumissionné.

(2) L'étude bien connue que Arnold a publiée en 1909 est basée sur cette hypothèse (v. Bibliographie).

(3) C'est de cette hypothèse que M. O. Boehm s'est servie dans le remarquable travail qu'il a fait paraître en 1921 (V. Bibliographie).

Digitized by Google

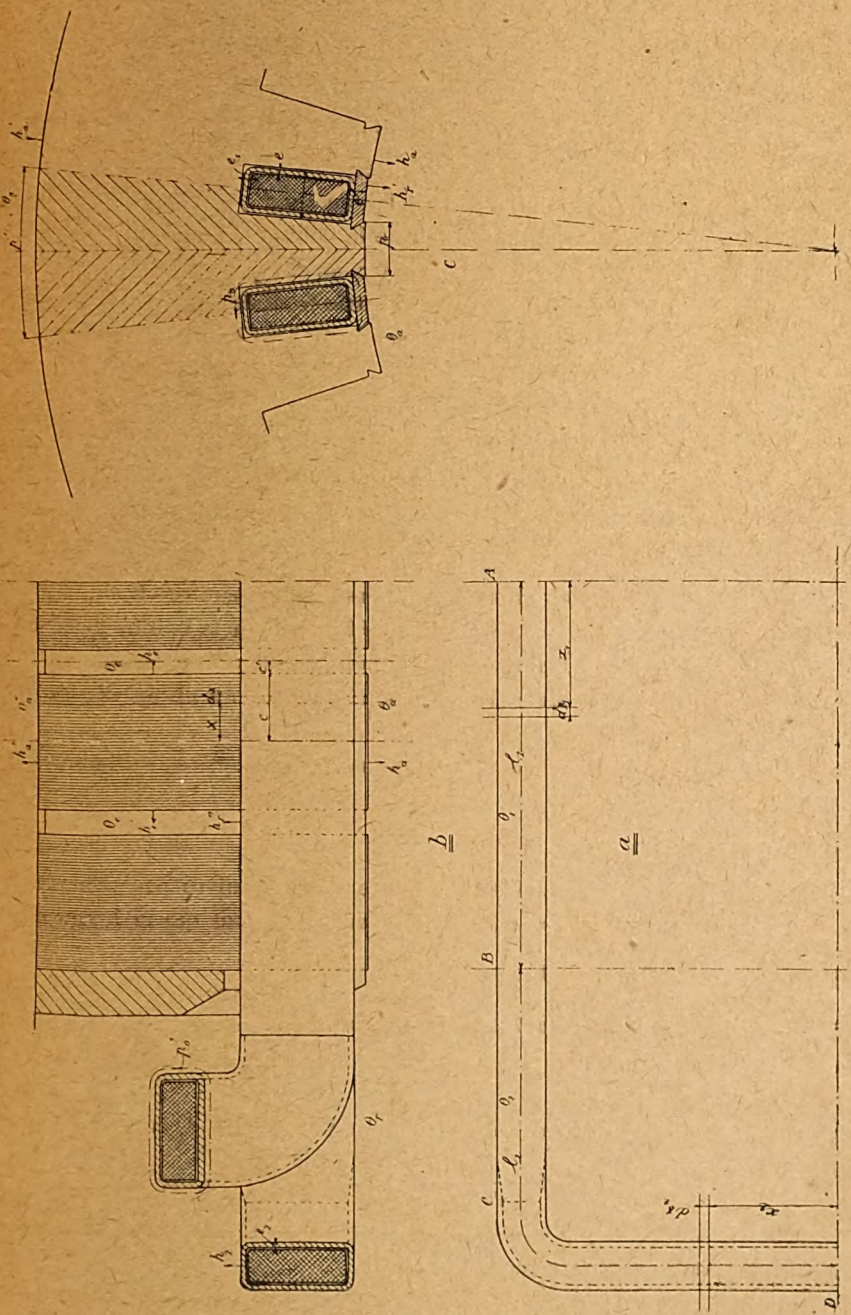


Fig. 13. — Coupes schématiques d'un stator d'alternateur.

Digitized by Google

d l'ouverture de l'encoche en cm ;

e_1 l'épaisseur de l'isolant sur la longueur l_1, e_2 celle sur la longueur l_2, en cm ;

e l'épaisseur totale de l'isolant entre cuivre et fer, y compris les espaces d'air éventuels, en cm ;

e' l'épaisseur totale de l'isolant entre le cuivre et l'air dans l'entrefer, y compris les espaces d'air éventuels, en cm ;

l_1 la demi longueur de la bobine dans le fer, en cm ;

l_2 la demi-longueur de la partie frontale de la bobine, en cm ;

p_0 le pourtour total de la bobine, dans le fer, en cm ;

p'_0 le pourtour total de la bobine, dans sa partie frontale, en cm ;

s_0 la section totale de tous les conducteurs logés dans l'encoche, en cm^2.

Désignons d'autre part par :

I le courant total dans tous les conducteurs, en ampères ;

$\Delta = \frac{I}{s_0}$ la densité de courant dans le cuivre, en $\frac{\text{ampères}}{\text{cm}^2}$;

α le coefficient de variation de la résistance avec la température en (degrés centésimaux)$^{-1}$, à une température $0'$ (1) ;

ρ la résistivité du cuivre en ohms-cm, à la même température $0'$ (1).

0_1 la température du cuivre à l'endroit x de la partie de la bobine logée dans le fer, 0_2 de la partie frontale de la bobine, en degrés centésimaux ;

0_e la température de l'air de refroidissement dans les évents en degrés centésimaux ;

0_r la température de l'air de refroidissement sur les têtes de bobines, en degrés centésimaux.

Soient enfin :

k_1 le coefficient d'augmentation des pertes dans le cuivre par courants de Foucault, sur la longueur l_1, k_2 le même coefficient sur la longueur l_2 ;

K_0 la conductibilité thermique du cuivre, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}}$;

K_r la conductibilité résultante de l'isolation, d'épaisseur e, entre cuivre et fer, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}}$;

K'_r la conductibilité résultante de l'isolation d'épaisseur e', entre le cuivre et l'air dans l'entrefer, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}}$;

---

(1) La valeur de α est donnée par la formule

$$\alpha = \frac{1}{234,5 + 0'},$$

où $0'$ est la température initiale de l'enroulement. On a alors, en désignant par ρ la résistivité à la température $0'$, pour la résistivité ρ_0 à une température 0

$$\rho_0 = \rho(1 + \alpha 0).$$

Digitized by Google

K_{r1} la conductibilité résultante de l'isolation d'épaisseur e_1, dans les évents, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}}$;

K_{r2} la conductibilité résultante de l'isolation d'épaisseur e_2 sur la longueur l_2, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}}$;

h' le coefficient d'émission de chaleur de l'encoche vers l'air dans l'entrefer et h'_r le coefficient résultant au même endroit, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$;

h'' le coefficient d'émission de chaleur de la bobine dans les évents et h''_r le coefficient résultant au même endroit, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$;

h_1 le coefficient d'émission de chaleur *équivalent* sur la longueur l_1, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$;

h'_2 le coefficient d'émission de chaleur sur la longueur l_2 ;

h_2 le coefficient d'émission de chaleur résultant sur la même longueur, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$.

Un mot d'abord sur le sens de l'expression « coefficient d'émission de chaleur équivalent ». Nous avons désigné par h'' le coefficient d'émission de chaleur dans les évents; en tenant compte de ce que la conductibilité résultante de l'isolation d'épaisseur e_1 est K_{r1}, on a d'après la formule (12) du paragraphe 3, pour le coefficient résultant h''_r :

$$h''_r = \frac{h'' K_{r1}}{K_{r1} + e_1 h''} . \tag{1}$$

De même entre cuivre et air dans l'entrefer :

$$h'_r = \frac{h' K'_r}{K'_r + e' h'} . \tag{2}$$

La surface réelle de la bobine est hétérogène quant aux conditions de refroidissement, car la partie logée dans le fer ne refroidit pas; celle située dans l'évent, et celle en contact avec l'air dans l'entrefer à travers la cale de retenue, refroidissent, mais chacune avec un coefficient différent. Nous assimilons cette surface hétérogène à une surface homogène, ayant partout le même coefficient d'émission de chaleur h_1 équivalent, qui est par conséquent défini par

$h_1 \times$ surface totale $= h'_r \times$ surface en contact avec l'air dans l'entrefer,
$+ h''_r \times$ surface dans l'évent,

ou encore

$$h_1 = \frac{h'_r d(c + c') + h''_r (p_0 - d) c'}{p_0 (c + c')} . \tag{3}$$

Digitized by Google

Nous devons écrire que la somme des quantités de chaleur emmagasinées et produites dans un élément de longueur dx doit être égale à la chaleur dissipée à la surface, ce qui, d'après ce que nous avons vu au chapitre premier peut s'écrire, pour la partie de la bobine logée dans le fer, entre A et B (fig. 13 *a*) :

$$(4) \qquad K_0 s_0 \frac{d^2\theta_1}{dx_1^2} dx_1 + \frac{k_1 I^2 \rho (1 + \alpha\theta_1)}{s_0} dx_1 = h_1 p_0 (\theta_1 - \theta_e) dx_1,$$

ou

$$(4\,a) \qquad K_0 s_0 \frac{d^2\theta_1}{dx_1^2} + \frac{k_1 I^2 \rho (1 + \alpha\theta_1)}{s_0} = h_1 p_0 (\theta_1 - \theta_e),$$

et pour la partie frontale, entre B et D

$$(4\,b) \qquad K_0 s_0 \frac{d^2\theta_2}{dx_2^2} + \frac{k_2 I^2 \rho (1 + \alpha\theta_2)}{s_0} = h_2 p_0' (\theta_2 - \theta_e).$$

On remarque que l'équation de Poisson et les conditions à la surface ne forment ici qu'une seule relation.

Nous avons admis deux régions distinctes AB et BD, soumises à des conditions de refroidissement différentes. En réalité, nous devrions subdiviser la partie frontale en deux régions, BC et CD, la première étant isolée par la même gaine que la partie de la bobine logée dans le fer. Nous ne ferons pas ce calcul ici, car il se déduit aisément des développements que nous donnons. Il est d'ailleurs généralement permis d'admettre les mêmes conditions de refroidissement pour les deux régions BC et CD; en effet, s'il est vrai que dans la région CD l'isolation est plus faible qu'en BC, l'air occlus entre les différentes couches de ruban diminue sa conductibilité.

On tire de (4 *a*)

$$(4\,c) \qquad \frac{d^2\theta_1}{dx_1^2} - \frac{1}{K_0 s_0}\left(h_1 p_0 - \frac{k_1 I^2 \rho \alpha}{s_0}\right)\theta_1 + \frac{1}{K_0 s_0}\left(\frac{k_1 I^2 \rho}{s_0} + h_1 p_0 \theta_e\right) = 0,$$

et de (4 *b*)

$$(4\,d) \qquad \frac{d^2\theta_2}{dx_2^2} - \frac{1}{K_0 s_0}\left(h_2 p_0' - \frac{k_2 I^2 \rho \alpha}{s_0}\right)\theta_2 + \frac{1}{K_0 s_0}\left(\frac{k_2 I^2 \rho}{s_0} + h_2 p_0' \theta_e\right) = 0.$$

En désignant respectivement dans ces équations par a_1^2 et a_2^2, les coefficients de θ_1 et θ_2 et par b_1 et b_2, les termes constants, on a

$$(4\,e) \qquad \frac{d^2\theta_1}{dx_1^2} - a_1^2\theta_1 + b_1 = 0,$$

et

$$(4\,f) \qquad \frac{d^2\theta_2}{dx_2^2} - a_2^2\theta_2 + b_2 = 0.$$

Les deuxièmes membres de (4 *e*) et (4 *f*) sont toujours négatifs, les valeurs de a_1^2 et a_2^2 étant toujours positives; il s'ensuit que la solution de ces équations différentielles est respectivement

Digitized by Google

$$(5\,a) \qquad \theta_1 = A_1 \cosh a_1 x_1 + B_1 \sinh a_1 x_1 + \frac{b_1}{a_1^2},$$

$$(5\,b) \qquad \theta_2 = A_2 \cosh a_2 x_2 + B_2 \sinh a_2 x_2 + \frac{b_2}{a_2^2}.$$

Pour trouver les quatre constantes A_1, B_1, A_2, B_2, nous disposons des quatre conditions suivantes :

Pour $x_1 = 0$ on a, par raison de symétrie

$$(6\,a) \qquad \frac{d\theta_1}{dx_1} = 0,$$

et de même, pour $x_2 = 0$.

$$(6\,b) \qquad \frac{d\theta_2}{dx_2} = 0.$$

Pour $x_1 = l_1$ et $x_2 = l_2$ il faut que

$$(6\,c) \qquad \theta_1 = \theta_2$$

et

$$(6\,d) \qquad \frac{d\theta_1}{dx_1} = -\frac{d\theta_2}{dx_2},$$

ces deux conditions exprimant la continuité du flux de chaleur (V. les relations (7) et (8) du paragraphe 3).

On a de (6 *a*)

$$(a_1 A_1 \sinh a_1 x_1 + a_1 B_1 \cosh a_1 x_1)_{x_1=0} = 0,$$

ce qui donne

$$B_1 = 0,$$

et de même de (6 *b*)

$$B_2 = 0.$$

La relation (6 *c*) devient

$$A_1 \cosh a_1 l_1 + \frac{b_1}{a_1^2} = A_2 \cosh a_2 l_2 + \frac{b_2}{a_2^2},$$

et de même (6 *d*)

$$a_1 A_1 \sinh a_1 l_1 = -a_2 A_2 \sinh a_2 l_2.$$

Les valeurs de A_1 et A_2 tirées de ces deux dernières relations sont

$$(7\,a) \qquad A_1 = \frac{-a_2\left(\frac{b_1}{a_1^2} - \frac{b_2}{a_2^2}\right)\sinh a_2 l_2}{a_2 \sinh a_2 l_2 \cosh a_1 l_1 + a_1 \sinh a_1 l_1 \cosh a_2 l_2},$$

et

$$(7\,b) \qquad A_2 = \frac{a_1\left(\frac{b_1}{a_1^2} - \frac{b_2}{a_2^2}\right)\sinh a_1 l_1}{a_2 \sinh a_2 l_2 \cosh a_1 l_1 + a_1 \sinh a_1 l_1 \cosh a_2 l_2}.$$

On a donc finalement pour θ_1 et θ_2

$$(8\,a) \qquad \theta_1 = A_1 \cosh a_1 x_1 + \frac{b_1}{a_1^2};$$

Digitized by Google

$$(8\,b) \qquad \theta_2 = A_2 \cosh a_2 x_2 + \frac{b_2}{a_2^2}.$$

les constantes A_1 et A_2 ayant les valeurs données par (7) et les coefficients a_1 et b_1 étant donnés par

$$(9\,a) \qquad a_1^2 = \frac{1}{K_0}\left(h_1 \frac{p_0}{s_0} - k_1 \Delta^2 \rho \alpha\right),$$

$$(9\,b) \qquad a_2^2 = \frac{1}{K_0}\left(h_2 \frac{p'_0}{s_0} - k_2 \Delta^2 \rho \gamma\right),$$

$$(9\,c) \qquad b_1 = \frac{1}{K_0}\left(k_1 \Delta^2 \rho + h_1 \frac{p_0}{s_0} \theta_e\right),$$

$$(9\,d) \qquad b_2 = \frac{1}{K_0}\left(k_2 \Delta^2 \rho + h_2 \frac{p'_0}{s_0} \theta_e\right),$$

valeurs tirées de (4 *c*) et (4 *d*).

β. *On tient compte de toutes les surfaces rayonnantes, en admettant comme seule hypothèse que dans les tôles la température est la même dans tous points d'un plan perpendiculaire à l'axe de la machine.* — (En d'autres termes, la conductibilité longitudinale dans le plan de la tôle est admise infiniment plus grande que la conductibilité transversale). On admet d'abord que la température, en chaque point du conducteur compris entre les axes d'évents voisins, a la même valeur θ_0, ce qui se justifie par la très grande conductibilité du cuivre par rapport à la conductibilité transversale des tôles.

Par raison de symétrie, il suffit de considérer seulement un élément de la couronne du stator, correspondant au pas d'une encoche (V. la partie hachurée de la fig. 13 *c*).

Nous ajoutons encore les notations suivantes (V. fig. 13 *b* et 13 *c*).

p la largeur de la dent mesurée sur le diamètre d'alésage des tôles du stator, en cm ;

p' la largeur de l'élément de la couronne du stator, mesurée sur le diamètre extérieur de la couronne, en cm ;

v_f le volume de l'élément, en cm³, sur la longueur d'un paquet par exemple ;

P_f les pertes dans le fer de volume v_f, en watts ;

θ_a la température de l'air de refroidissement dans l'entrefer, en degrés centésimaux ;

θ'_a la température de l'air de refroidissement à la surface extérieure de la couronne des tôles, en degrés centésimaux ;

θ la température du fer, à une distance x de l'axe d'un paquet de tôles, en degrés centésimaux ;

h_a le coefficient d'émission de chaleur vers l'entrefer, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$;

Digitized by Google

h'_a le coefficient d'émission de chaleur à la surface extérieure de la couronne des tôles, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$;

h_e le coefficient d'émission de chaleur dans les évents, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$;

K_f la conductibilité transversale des tôles, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}}$.

Nous écrivons l'équation de Poisson

$$K_f \frac{d^2\theta}{dx^2} + w_f = 0,$$

ou

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{w_f}{K_f} = 0, \tag{1}$$

en désignant par w_f la somme des pertes produite ou introduite dans l'unité de volume, soustraction faite de la partie rayonnée.

La partie des pertes produites dans l'unité de volume est

$$\frac{P_f}{v_f}.$$

Pour déterminer les parties introduite et rayonnée nous considérons un élément de largeur dx (fig. 13*b*). La quantité de chaleur introduite dans cet élément est

$$K_r \frac{\theta_0 - \theta}{e} (p_0 - d)dx, \tag{2 a}$$

et la quantité de chaleur rayonnée par cet élément

$$h_a(\theta - \theta_a)pdx + h'_a(\theta - \theta'_a)p'dx. \tag{2 b}$$

Nous devons diviser la somme de (2 *a*) et (2 *b*) par le volume de l'élément de largeur dx pour trouver la somme des pertes introduite et rayonnée par unité de volume.

Or, le volume de l'élément de largeur dx est

$$v_f \frac{dx}{2c}.$$

Cela donne pour w_f la valeur

$$w_f = \frac{P_f}{v_f} + \frac{K_r}{v_f} \frac{\theta_0 - \theta}{e} (p_0 - d)2c - [h_a(\theta - \theta_a)p + h'_a(\theta - \theta'_a)p'] \frac{2c}{v_f},$$

ou

$$\frac{w_f}{K_f} = \frac{1}{v_f K_f}\left[P_f + K_r\theta_0 \frac{2c(p_0 - d)}{e} + 2c(h_a p\theta_a + h'_a p'\theta'_a)\right] - \frac{2c}{v_f K_f}\left[K_r \frac{p_0 - d}{e} + h_a p + h'_a p'\right]\theta, \tag{3}$$

ce qui devient, en désignant par m le terme constant, et par n^2 le coefficient de θ

Digitized by Google

$$(3\,a) \qquad \frac{w_f}{K_f} = m - n^2\theta.$$

L'équation (1) s'écrit dans ces conditions

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - n^2\theta + m = 0.$$

La valeur de n^2 étant essentiellement positive, l'intégrale de cette équation différentielle est, en tenant compte de la symétrie

$$(4) \qquad \theta = A \cosh nx + \frac{m}{n^2}.$$

Pour déterminer la constante A, nous disposons de la condition de refroidissement à la surface des évents; il faut que pour $x = c$ (V. les formules (4) du paragraphe 3).

$$- K_f \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=c} = h_e(\theta_{x=c} - \theta_e),$$

ce qui donne de (4)

$$- nA \sinh nc = \frac{h_e}{K_f} A \cosh nc + \frac{h_e}{K_f}\left(\frac{m}{n^2} - \theta_e\right).$$

On en tire pour A la valeur

$$(5) \qquad A = \frac{h_e\left(\theta_e - \frac{m}{n^2}\right)}{nK_f \sinh n_c + h_e \cosh n_c}.$$

La solution est donc déterminée par la formule (4), dans laquelle la valeur de la constante A est donnée par (5) et où les coefficients m et n^2 ont les valeurs suivantes, tirées de (3)

$$(6\,a) \qquad m = \frac{1}{v_f K_f}\left[P_f + K_r\theta_0 \frac{2c'p_0 - d)}{e} + 2c(h_a p\theta_a + h'_a p'\theta'_a)\right],$$

$$(6\,b) \qquad n^2 = \frac{2c}{v_f K_f}\left(K_r \frac{p_0 - d}{e} + h_a p + h'_a p'\right).$$

Si on connaissait la température θ_0 du cuivre, on pourrait donc déterminer, au moyen des formules (4), (5) et (6), la température du fer θ à un endroit x quelconque, sous réserve des hypothèses admises; il faut donc avant tout procéder à la détermination de la température du cuivre.

Le premier calcul de la température du cuivre reposait sur l'hypothèse d'un échange de chaleur nul entre cuivre et fer. Le calcul que nous venons d'effectuer nous permet maintenant de déterminer cette quantité de chaleur échangée sur la longueur d'un paquet; elle a la valeur :

Digitized by Google

$$(7) \qquad K_r \frac{\theta_0 - \theta_m}{e}(p_0 - d)2c,$$

en désignant par θ_m la température moyenne du fer sur la longueur c. On a de (4)

$$\theta_m = \frac{1}{c}\int_0^c \left(A \cosh nx + \frac{m}{n^2}\right)dx,$$

ou

$$(8) \qquad \theta_m = A \frac{\sinh nc}{nc} + \frac{m}{n^2}.$$

La quantité de chaleur échangée par unité de longueur entre cuivre et fer est en réalité fonction de l'abscisse, car cette quantité est variable avec θ, mais nous admettons dans ce qui suit qu'elle est constante; cela est permis du fait de la très grande conductibilité du cuivre par rapport à la conductibilité transversale du fer. La quantité de chaleur échangée sur une longueur dx_1 est alors, en introduisant de nouveau la température variable θ_1 du cuivre et en tenant compte de ce que l'échange de chaleur ne se fait que sur la longueur $2c$, et non $2(c + c')$

$$(7\,a) \qquad K_r \frac{\theta_1 - \theta_m}{e}(p_0 - d\,dx_1 \frac{c}{c + c'},$$

quantité de chaleur qui est à ajouter au terme $h_1 p_0(\theta_1 - \theta_e)dx_1$ du deuxième membre de l'équation (4) du paragraphe précédent α, pour avoir la solution générale du problème. On obtient, en combinant les relations (5), (6) et (8), pour la différence $\theta_1 - \theta_m$:

$$(9) \quad \theta_1 - \theta_m = \left[1 - (1 - \gamma)\frac{K_r \frac{p_0 - d}{e}}{K_r \frac{p_0 - d}{e} + h_a p + h'_a p'}\right]\theta_1 - \gamma\theta_e - (1 - \gamma)\frac{\frac{P_f}{2c} + h_a p\theta_a + h'_a p'\theta'_a}{K_r \frac{p_0 - d}{e} + h_a p + h'_a p'},$$

en désignant par γ l'expression

$$(10) \qquad \gamma = \frac{h_e \frac{\sinh nc}{nc}}{nK_f \sinh nc + h_e \cosh nc}.$$

En introduisant (7 a) dans la relation (4) du paragraphe α et en tenant compte de (9) et de (10), on obtient

Digitized by Google

$$(11)\quad \left\{\begin{aligned} 0 = \frac{d^2\theta_1}{dx_1^2} - \frac{1}{K_0}\Bigg[& h_1\frac{p_0}{s_0} - k_1\Delta^2\rho\alpha + \frac{K_r}{s_0}\frac{p_0 - d}{c+c'}\frac{c}{e}\left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\frac{h_a p + h'_a p'}{K_r(p_0-d)}e}\right)\Bigg]\theta_1 \\ & + \frac{1}{K_0}\Bigg[k_1\Delta^2\rho + \frac{h_1 p_0 + K_r\frac{p_0-d}{c+c'}\frac{c}{e}\gamma}{s_0}\theta_e \\ & + \frac{\frac{P_f}{2c} + h_a p\theta_a + h'_a p'\theta'_a}{s_0}\frac{(1-\gamma)\frac{c}{c+c'}}{1+\frac{h_a p + h'_a p'}{K_r(p_0-d)}e}\Bigg]. \end{aligned}\right.$$

En désignant par u^2 le coefficient de θ, et par v le terme constant on a

$$(11\,a)\qquad \frac{d^2\theta_1}{dx_1^2} - u^2\theta_1 + v = 0,$$

pour la nouvelle équation différentielle, permettant de déterminer la température θ_1 du cuivre. Elle remplace l'équation (4 *e*) du paragraphe α et donne en combinaison avec (4 *f*) du même paragraphe, la solution complète du problème. Il suffit de remplacer dans les relations (7) et (8 *a*) du paragraphe α, les valeurs de a_1 et b_1 respectivement par celles de u et de v. On a donc

$$(12\,a)\qquad \theta_1 = A'_1\cosh ux_1 + \frac{v}{u^2},$$

$$(12\,b)\qquad \theta_2 = A'_2\cosh a_2 x_2 + \frac{b_2}{a_2^2},$$

avec

$$(13\,a)\qquad A'_1 = \frac{-a_2\left(\frac{v}{u^2} - \frac{b_2}{a_2^2}\right)\sinh a_2 l_2}{a_2\sinh a_2 l_2\cosh ul_1 + u\sinh ul_1\cosh a_2 l_2},$$

$$(13\,b)\qquad A'_2 = \frac{u\left(\frac{v}{u^2} - \frac{b_2}{a_2^2}\right)\sinh ul_1}{a_2\sinh a_2 l_2\cosh ul_1 + u\sinh ul_1\cosh a_2 l_2},$$

$$(14\,a)\qquad u^2 = \frac{1}{K_0}\left[h_1\frac{p_0}{s_0} - k_1\Delta^2\rho\alpha + \frac{K_r}{s_0}\frac{p_0-d}{c+c'}\frac{c}{e}\left(1 - \frac{1-\gamma}{1+\frac{h_a p + h'_a p'}{K_r(p_0-d)}e}\right)\right],$$

et

$$(14\,b)\qquad v = \frac{1}{K_0}\Bigg[k_1\Delta^2\rho + \frac{h_1 p_0 + K_r\frac{p_0-d}{c+c'}\frac{c}{e}\gamma}{s_0}\theta_e + \frac{\frac{P_f}{2c} + h_a p\theta_a + h'_a p'\theta'_a}{s_0}\times\frac{(1-\gamma) - \frac{c}{c+c'}}{1+\frac{h_a p \quad h'_a p}{K_r(p_0-d)}e}\Bigg],$$

Digitized by Google

les valeurs de a_2 et b_2 étant données respectivement par les relations (9 *b*) et (9 *d*), et γ par la relation (10).

On trouve alors la température du fer, dans un paquet donné, par l'emploi de la formule (4), dans laquelle on prend pour θ_0 la valeur de θ_1 correspondant au milieu du paquet considéré. La température maximum du fer dans un paquet donné correspond à $x = 0$ et a donc la valeur, tirée de (4)

$$\theta_{max} = A + \frac{m}{n^2}. \tag{15}$$

On détermine la température moyenne $\overline{\theta_0}$ du cuivre, celle qui est mesurée par augmentation de résistance, en écrivant

$$\overline{\theta_0} = \frac{1}{l_1 + l_2}\left(\int_{-l_2}^{0} \theta_2 dx_2 + \int_{0}^{l_1} \theta_1 dx_1\right),$$

ce qui donne

$$\overline{\theta_0} = \frac{1}{l_1 + l_2}\left(\frac{A_1'}{u}\sinh u l_1 + \frac{A_2'}{a_2}\sinh a_2 l_2 + \frac{v}{u^2} l_1 + \frac{b_2}{a_2^2} l_2\right). \tag{16}$$

Les températures extrêmes sont définies par $x_1 = 0$ et $x_2 = 0$. En général le maximum a lieu pour $x_1 = 0$ et le minimum pour $x_2 = 0$, mais selon les conditions de refroidissement le contraire pourrait aussi avoir lieu. On a

$$\theta_{1M} = A_1' + \frac{v}{n^2}, \tag{17 a}$$

et

$$\theta_{2M} = A_2' + \frac{b_2}{a_2^2}. \tag{17 b}$$

8. — *Application numérique à un cas pratique des résultats obtenus dans les paragraphes* (7 α) et (7 β) [1].

Les constantes de la machine pour l'hypothèse (7 α) sont les suivantes :

$2c = 5{,}8$ cm, $2c' = 1{,}0$ cm, $d = 1{,}45$ cm ;

$e_1 = 0{,}15$ cm de micanite + $0{,}005$ cm de tresse de coton + $0{,}005$ cm d'espace d'air = $0{,}160$ cm ;

$e_2 = 0{,}04$ cm de tresse de soie micassée + $0{,}08$ cm de ruban diagonal + $0{,}005$ cm de tresse de coton + $0{,}005$ cm d'espace d'air = $0{,}13$ cm ;

$e = e_1 + 0{,}025$ cm d'espace d'air = $0{,}185$ cm ;

$e' = 0{,}15$ cm de micanite + $0{,}01$ cm de tresse de coton + $0{,}025$ cm d'espace d'air + $0{,}60$ cm pour la cale en bois = $0{,}785$ cm ;

---

(1) Cet exemple numérique, ainsi que les suivants, ont été calculés par M. G. Kouskoff, ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécaniques, auquel je rends hommage ici pour sa collaboration patiente et dévouée.

Digitized by Google

$l_1 = 3(5,8 + 1,0) = 20,5$ cm, $l_2 = 37$ cm ;
$p_0 = 2(4,2 + 1,45) = 11.3$ cm, $p_0' = 2(3,88 + 1,34) = 10,44$ cm ;
$s_0 = 12(0,29 + 1,08) = 3,76$ cm² ;
$\Delta = 350$ ampères : cm² et admettons $k_1 = k_2 = 1,5$.

On admet comme température de départ $0' = 20°$C, et toutes les températures de cet exemple sont des élévations de températures au-dessus de 20°C.

On a

$$\rho_{20} = 1,722 \times 10^{-6} \text{ ohms-cm}, \qquad \alpha_{20} = 3\,93 \times 10^{-3} \frac{1}{1°}.$$

Nous admettons que l'air soufflé sur les têtes de bobines a subi une augmentation de température de 8°C, ce qui donne $\theta_r = 8°$, et que la température de l'air dans les évents a trouvé une augmentation de 18°C, provenant en partie de son passage à travers les inducteurs et en partie de la chaleur rayonnée par les évents mêmes; nous posons donc $\theta_v = 18°$.

Pour le calcul des conductibilités thermiques résultantes des isolants, nous nous basons sur les valeurs suivantes des conductibilités composantes, exprimées en $\frac{\text{watts}}{1° - \text{cm}}$:

micanite 2×10^{-3}, tresse de soie micassée 1×10^{-3} ;
ruban diagonal 1×10^{-3}, tresse de coton $0,4 \times 10^{-3}$;
bois $1,6 \times 10^{-3}$, air $0,23 \times 10^{-3}$.

Nous obtenons par l'emploi de la formule (3 *a*) du paragraphe 1 :

$$\frac{e_1}{K_{r1}} = \left(\frac{0,15}{2} + \frac{0,005}{0,4} + \frac{0,005}{0,23}\right)10^3 \qquad \text{d'où} \quad K_{r1} = 1,46 \times 10^{-3},$$

$$\frac{e_2}{K_{r2}} = \left(\frac{0,04}{1} + \frac{0,08}{1} + \frac{0,005}{0,4} + \frac{0,005}{0,4}\right)10^3 \quad \text{d'où} \quad K_{r2} = 0,84 \times 10^{-3},$$

$$\frac{e}{K_r} = \left(\frac{0,15}{2} + \frac{0,005}{0,4} + \frac{0,03}{0,23}\right)10^{-3} \qquad \text{d'où} \quad K_r = 0,80 \times 10^{-3},$$

$$\frac{e'}{K_r'} = \left(\frac{0,15}{2} + \frac{0,01}{0,4} + \frac{0,025}{0,23} + \frac{0,06}{1,6}\right)10^3 \quad \text{d'où} \quad K_r' = 1,35 \times 10^{-3}.$$

En ce qui concerne les coefficients d'émission de chaleur, nous prenons sur la courbe I de la figure 10, pour une vitesse d'air de 46 m : s

$$h' = h'' = 16 \times 10^{-3} \frac{\text{watts}}{1° - \text{cm}^2}.$$

On déduit des valeurs précédentes, par l'emploi des formules (1) et (2) du paragraphe (7 *a*)

$$h_r' = \frac{16 \times 1,35 \times 10^{-3}}{1,35 + 0,785 \times 16} = 1,56 \times 10^{-3} \frac{\text{watts}}{1° - \text{cm}^2},$$

Digitized by Google

et

$$h''_r = \frac{16 \times 1{,}46 \times 10^{-3}}{1{,}46 + 0{,}16 \times 16} = 5{,}81 \times 10^{-3} \frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}.$$

On en tire, par la formule (3) du même paragraphe

$$h_1 = \frac{1{,}56 \times 10^{-3} \times 1{,}45 \times 6{,}8 + 5{,}81 \times 10^{-3} \times 9{,}85 \times 1}{11{,}3 \times 6{,}8} = 0{,}95 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2}.$$

On a de plus, en admettant une vitesse d'air de 25 m : s sur les têtes de bobines

$$h'_2 = 13{,}5 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2},$$

ce qui donne, en employant la formule (12) du paragraphe 3

$$h_r = \frac{13{,}5 \times 0{,}84 \times 10^{-3}}{0.84 + 0{,}13 \times 13{,}5} = 4{,}36 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2}.$$

Ajoutons encore les constantes relatives à l'hypothèse du paragraphe (7 β).

$$p = 1{,}37 \text{ cm}, \quad p' = 3{,}92 \text{ cm}, \quad v_f = 307 \text{ cm}^3, \quad P_f = 23{,}9 \text{ watts}.$$

Nous posons de plus $\theta_a = \theta_r = 8^\circ$ et $\theta'_a = 28^\circ$ ce qui tient compte de ce que l'air sur le dos des tôles a subi une augmentation de température considérable du fait qu'il a emmené une grande partie des pertes de la machine. La valeur de θ'_a est à évaluer d'après la valeur des pertes que l'on estime *a priori* comme devant être entraînées par l'air passant dans les évents, et est à contrôler lorsque les calculs sont terminés.

Pour la valeur de h_a nous tenons compte du fait que l'air souffle dans l'évent sur la surface rugueuse des tôles, en augmentant de 30 pour cent la valeur donnée par la courbe I de la figure 10, et en posant

$$h_a = 1{,}3 \times 16 \times 10^{-3} = 20{,}8 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2}.$$

Nous estimons la valeur de h'_a à

$$h'_a = 1{,}2 \times 6 \times 10^{-3} = 7 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2},$$

en admettant une vitesse d'air de 7 m : s environ à la surface de la tôle. Pour tenir compte de la rugosité des tôles, nous prenons ici le coefficient 1,2 au lieu de 1,3 en nous basant sur les expériences de M. G. Luke, qui indiquent que ce coefficient baisse avec la vitesse de l'air (courbes III et IV de la fig. 10).

Nous prenons enfin les valeurs suivantes pour les conductibilités thermiques K_0 du cuivre, et transversale K_f des tôles

$$K_0 = 3{,}84 \quad \text{et} \quad K_f = 0{,}005 \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}.$$

Digitized by Google

En effectuant les calculs, on trouve pour le cas de l'hypothèse du paragraphe (7 α), par l'emploi des formules (9)

$$a_1 = 0{,}0207\ \text{cm}^{-1}, \quad a_2 = 0{,}0533\ \text{cm}^{-1}, \quad \frac{b_1}{a_1^2} = 216°\text{C}, \quad \frac{b_2}{a_2^2} = 37°\text{C},$$

ce qui, introduit en (7), donne

$$A_1 = -138°\text{C}, \quad A_2 = +6{,}7°\text{C}$$

et finalement, par (8)

$$\theta_1 = 216 - 138 \cosh 0{,}0207 x_1 \quad [0 \leqslant x_1 \leqslant 20{,}5],$$

et

$$\theta_2 = 37 + 6{,}7 \cosh 0{,}0533 x_2 \quad [0 \leqslant x_2 \leqslant 37].$$

La courbe représentant θ_1 et θ_2 en fonction de x_1 et x_2 est donnée par

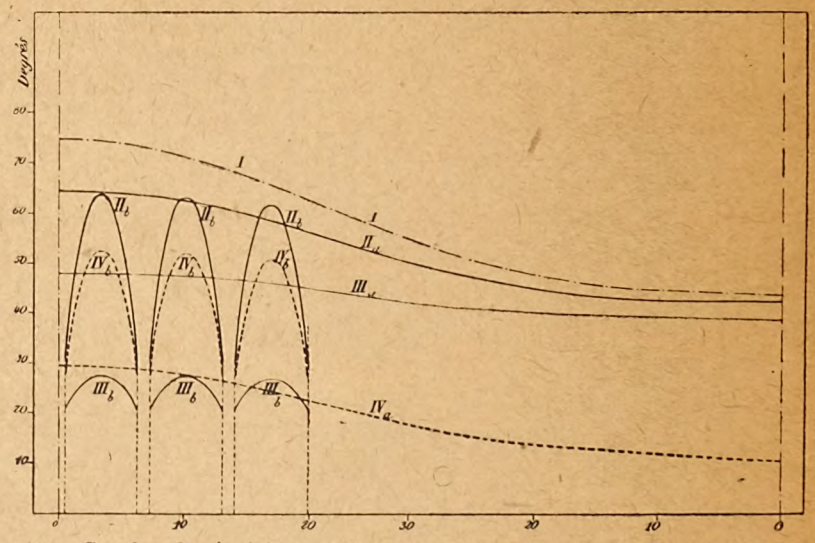


Fig. 14. — Courbes de répartition de la température dans le stator d'un alternateur.

la courbe I de la figure 14. On constate une température maximum du cuivre de 78°C.

L'hypothèse du paragraphe (7 β) est plus intéressante et a été appliquée à trois fonctionnements différents de la machine. On a d'abord admis que la machine fonctionnait à charge normale (courbes II de la figure 14), ensuite on a cherché à se rendre compte de la répartition de la température lors de la marche en court-circuit, aucune perte n'existant dans le fer, l'échauffement de celui-ci étant uniquement produit par la chaleur provenant du cuivre (courbes III de la figure 14). Comme troisième problème on a admis le cas de la marche à vide, toutes les pertes existant dans le fer, et le cuivre étant seulement chauffé par la chaleur transmise du fer (courbes IV de la

Digitized by Google

figure 14). Il est intéressant de constater comment s'effectue l'échange de chaleur dans les différents cas.

On obtient des formules (14) du paragraphe (7 β), tous calculs effectués

$$u = 0{,}0481 \text{ cm}^{-1}, \quad \frac{v}{u^2} = 81{,}2°\text{C},$$

les valeurs de a_2 et $\frac{b_2}{a_2^2}$ étant celles de l'exemple précédent.

Les formules (13) donnent

$$A_1' = -16{,}7°\text{C}, \qquad A_2' = +5{,}05°\text{C},$$

ce qui donne pour la température du cuivre aux endroits x_1 et x_2, les valeurs tirées de (12).

$$\theta_1 = 81{,}2 - 16{,}7 \cosh 0{,}0481 x_1,$$
$$\theta_2 = 37 + 5{,}05 \cosh 0{,}0522 x_2.$$

Pour la température moyenne $\overline{\theta_0}$, telle qu'elle serait mesurée par augmentation de résistance, on tire de la formule (16)

$$\overline{\theta_0} = 51{,}7°\text{C}$$

La température θ du fer se déduit pour les différents paquets de tôles de la formule (4). On obtient, en suivant pour la valeur de θ_0 les instructions données, par l'emploi des formules (6).

Pour le premier paquet compté à partir de l'axe de la machine :

$$n = 0{,}61 \text{ cm}^{-1}, \qquad \frac{m}{n^2} = 79{,}5°\text{C}.$$

Pour le deuxième paquet :

$$n = 0{,}61 \text{ cm}^{-1}, \qquad \frac{m}{n^2} = 79{,}0°\text{C}.$$

Pour le troisième paquet :

$$n = 0{,}61 \text{ cm}^{-1}, \qquad \frac{m}{n^2} = 77{,}2°\text{C},$$

ce qui donne par (5) respectivement pour les trois paquets

$$A = -16{,}1°\text{C}, \quad -16{,}0°\text{C}, \quad -15{,}5°\text{C}.$$

La température à un endroit x d'un paquet, respectivement

$$\theta' = 79{,}5 - 16{,}1 \cosh 0{,}61x,$$
$$\theta'' = 79{,}0 - 16{,}0 \cosh 0{,}61x,$$
$$\theta''' = 77{,}2 - 15{,}5 \cosh 0{,}61x.$$

Pour la marche à vide (courbes IV), on obtient

$$\theta_1 = 41{,}7 - 12{,}15 \cosh 0{,}051 x_1,$$
$$\theta_2 = 8 + 3{,}49 \cosh 0{,}056 x_2,$$
$$\theta' = 65 - 12{,}35 \cosh 0{,}61x,$$
$$\theta'' = 64{,}2 - 12{,}15 \cosh 0{,}61x,$$
$$\theta''' = 62{,}5 - 11{,}70 \cosh 0{,}61x,$$

Digitized by Google

et pour la marche en court-circuit (courbes III)

$$\theta_1 = 55 - 6{,}8 \cosh 0{,}0481x_1,$$
$$\theta_2 = 37 + 2{,}05 \cosh 0{,}0533x_2,$$
$$\theta' = 30{,}9 - 5{,}19 \cosh 0{,}61x,$$
$$\theta'' = 30{,}6 - 5{,}00 \cosh 0\,61x,$$
$$\theta''' = 30{,}0 - 4{,}58 \cosh 0{,}61x.$$

Les températures extrêmes, telles que l'on les déduit des formules (17) sont

La température maximum $\theta_{1M} = 64{,}5°C$,

et la température minimum $\theta_{1M} = 42{,}05°C$.

On constate donc une différence de $78 - 64{,}5 = 13{,}5°C$ pour la température maximum du cuivre entre les hypothèses α et β.

9. — *La répartition de la température dans l'encoche du rotor d'un turbo-alternateur* (fig. 15). — Nous cherchons à déterminer la température maximum du cuivre d'un rotor de turbo-alternateur, rotor massif sans évents, le refroidissement du cuivre se faisant uniquement par un canal situé au fond de l'encoche. Le fait que nous ne cherchons pas la répartition de la température sur la longueur du rotor, mais seulement la température maximum, permet de nous affranchir d'une dimension; les rotors des turbo-alternateurs sont en effet toujours très longs, de sorte que le phénomène, tel qu'il se passe dans le voisinage du milieu de la machine, n'est pour ainsi dire pas influencé par les parties frontales de l'enroulement.

Nous pouvons écarter encore une dimension et ramener le problème à un problème à une seule dimension, par l'hypothèse suivante : Nous admettons que la largeur de l'encoche et celle de la dent sont suffisamment petites par rapport à leurs profondeurs, et que les conductibilités thermiques des métaux employés, cuivre et fer, sont assez élevées, pour qu'avec une approximation suffisante la température puisse être considérée comme constante sur toute la largeur du cuivre dans l'encoche et sur toute la largeur du fer dans la dent. Le problème se ramène donc à la recherche de la variation de la température du cuivre, sur la hauteur de l'encoche.

Nous introduisons les notations suivantes (fig. 15) :

b hauteur totale de la dent, en cm ;

b' hauteur de la dent correspondant à la partie du canal de ventilation, en cm ;

b_0 hauteur totale du cuivre, y compris l'isolation entre conducteurs, en cm ;

b'_0 hauteur de la cale, en cm ;

c largeur de la dent à sa base, en cm ;

Digitized by Google

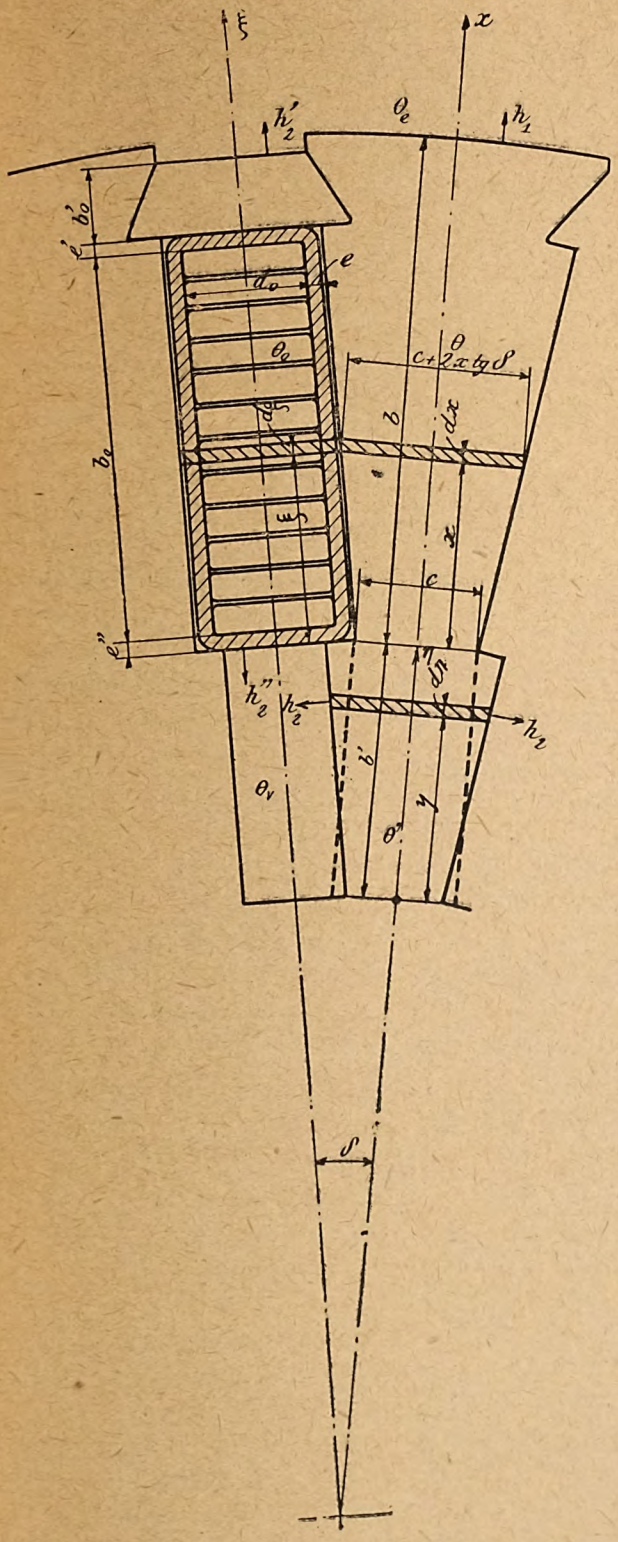


Fig. 15. — Coupe schématique d'un élément du rotor d'un turbo-alternateur.

Digitized by Google

d_0 largeur du cuivre, en cm ;

e épaisseur de la gaine isolante, y compris un espace d'air éventuel, en cm ;

e' épaisseur de la gaine isolante dans le haut de l'encoche, en cm ;

e'' épaisseur de la gaine isolante dans le bas de l'encoche, en cm ;

s_0 la section totale du cuivre dans l'encoche, en cm^2 ;

h_1 le coefficient d'émission de chaleur à la surface du rotor, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm^2}$;

h'_r le coefficient d'émission de chaleur résultant de la cale de retenue vers l'entrefer, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm^2}$;

h_2 le coefficient d'émission de chaleur dans le canal de ventilation, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm^2}$;

h''_r le coefficient d'émission de chaleur résultant du cuivre vers le canal de ventilation, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm^2}$;

K_r la conductibilité thermique résultante de l'isolation entre cuivre et fer, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm}$;

K'_r la conductibilité thermique résultante de l'ensemble d'isolation, dans le haut de l'encoche, y compris un espace d'air éventuel et la cale de retenue, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm}$;

K''_r la conductibilité thermique résultante de la gaine isolante, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm}$, (définie comme K'_r mais dans le bas de l'encoche) ;

K la conductibilité résultante du cuivre et de l'isolation entre conducteurs, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm}$;

K_f la conductibilité thermique du fer, en $\frac{\text{watts}}{1^\circ - cm}$;

θ_0 la température du cuivre à l'endroit ξ, en degrés centésimaux ;

θ la température du fer à l'endroit x, en degrés centésimaux ;

θ' la température du fer à l'endroit η, en degrés centésimaux ;

θ_e la température de l'air dans l'entrefer, en degrés centésimaux ;

θ_a la température de l'air dans le canal de ventilation, en degrés centésimaux.

ϑ l'angle entre l'axe de l'encoche et l'axe de la dent; I, Δ, α, ρ conservent leurs significations des problèmes précédents.

α. *Etablissement de l'équation différentielle générale.*

La quantité de chaleur produite dans un élément de cuivre, de hauteur $d\xi$, et d'une longueur axiale égale à l'unité de longueur, est

Digitized by Google

$$\frac{I^2\rho(1+\alpha\theta_0)}{s_0}\quad\frac{d\xi}{b_0}.$$

La différence entre la quantité de chaleur entrant dans l'élément et la chaleur sortant de ce même élément a la valeur

$$Kd_0\frac{d^2\theta_0}{d\xi^2}d\xi,$$

et celle transmise au fer

$$2K_r\frac{\theta_0-\theta}{e}d\xi.$$

Nous pouvons donc écrire la première relation :

$$Kd_0\frac{d^2\theta_0}{d\xi^2}+\frac{I^2\rho(1+\alpha\theta_0)}{s_0b_0}=2K'_r\frac{\theta_0-\theta}{e},$$

ou encore

$$(1)\qquad Kd_0\frac{d^2\theta_0}{d\xi^2}-\left(\frac{2K_r}{e}-\frac{I^2\rho\alpha}{s_0b_0}\right)\theta_0+\frac{I^2\rho}{s_0b_0}=-\frac{2K'_r}{e}\theta.$$

En ce qui concerne le fer, nous savons que la différence entre la chaleur entrant dans l'élément de hauteur dx et de longueur égale à l'unité de longueur et la chaleur sortant du même élément a la valeur :

$$K_f(c+2x\operatorname{tg}\delta)\frac{d^2\theta}{dx^2}dx,$$

et que la quantité de chaleur qui y pénètre, provenant du cuivre est

$$2K_r\frac{\theta_0-\theta}{e}d\xi.$$

Or on a

$$dx=d\xi\cos\delta,$$

ce qui donne

$$K_f(c+2x\operatorname{tg}\delta)\frac{d^2\theta}{dx^2}dx+2K_r\frac{\theta_0-\theta}{e}\frac{dx}{\cos\delta}=0,$$

ou

$$(2)\qquad K_f'c+2x\operatorname{tg}\delta)\frac{d^2\theta}{dx^2}-\frac{2K_r}{e}\frac{\theta}{\cos\delta}=\frac{-2K'_r}{e}\frac{\theta_0}{\cos\delta}.$$

Nous allons résoudre les équations (1) et (2) en fonction de θ_0. Nous avons de (1), en dérivant deux fois :

$$(3)\qquad Kd_0\frac{d^4\theta_0}{dx^4}\cos^2\delta-\left(\frac{2K_r}{e}-\frac{I^2\rho\alpha}{s_0b_0}\right)\frac{d^2\theta_0}{dx^2}=-\frac{2K_r}{e}\frac{d^2\theta}{dx^2},$$

ce qui donne, en introduisant en (2) les valeurs de θ et de $\frac{d^2\theta}{dx^2}$, tirées de (1) et (3) :

$$-K_f(c+2x\operatorname{tg}\delta)\frac{K}{2K_r}ed_0\cos^2\delta\frac{d^4\theta_0}{dx^4}$$

$$+K_f(c+2x\operatorname{tg}\delta)\frac{e}{2K_r}\left(\frac{2K'_r}{e}-\frac{I^2\rho\alpha}{s_0b_0}\right)\frac{d^2\theta_0}{dx^2}$$

Digitized by Google

$$+ \mathrm{K} d_0 \cos\delta \frac{d^2\theta_0}{dx^2} - \left(\frac{2\mathrm{K}_r}{e} - \frac{\mathrm{I}^2\rho\alpha}{s_0 b_0} \right) \frac{\theta_0}{\cos\delta}$$

$$+ \frac{\mathrm{I}^2\rho}{s_0 b_0} \frac{1}{\cos\delta} = - \frac{2\mathrm{K}_r}{e} \frac{\theta_0}{\cos\delta},$$

et finalement, pour la solution générale du problème, l'équation :

$$(4) \quad \left\{ \begin{aligned} & \mathrm{K} \frac{d^4\theta_0}{dx^4} - \frac{2\mathrm{K}_r}{e d_0 \cos^2\delta} \left(1 - \frac{e}{2\mathrm{K}_r} \frac{\mathrm{I}^2\rho\alpha}{s_0 b_0} + \frac{\mathrm{K}}{\mathrm{K}_f} \frac{d_0 \cos\delta}{c + 2x \operatorname{tg}\delta} \right) \frac{d^2\theta_0}{dx^2} \\ & - \frac{2\mathrm{K}'_r}{\mathrm{K}_f} \frac{\mathrm{I}^2\rho\alpha}{s_0 b_0} \frac{1}{e d_0 \cos^3\delta} \frac{1}{c + 2x \operatorname{tg}\delta} \theta_0 \\ & - \frac{2\mathrm{K}_r}{\mathrm{K}_f} \frac{\mathrm{I}^2\rho}{s_0 b_0} \frac{1}{e d_0 \cos^3\delta} \frac{1}{c + 2x \operatorname{tg}\delta} = 0. \end{aligned} \right.$$

La solution générale de cette équation différentielle linéaire de quatrième ordre, à coefficients variables, offrirait de très grandes difficultés et nous ne l'essayerons pas; pour obtenir une solution nous devons donc faire certaines simplifications, et plusieurs combinaisons sont possibles; celle qui donne la solution la plus simple est la suivante

$$(a) \qquad \mathrm{K} = 0, \quad \delta = 0, \quad \alpha = 0,$$

dans laquelle on admet qu'aucune chaleur ne s'écoule dans le sens longitudinal de l'encoche, en d'autres termes que le refroidissement du cuivre se fait uniquement à travers la dent; cette combinaison ne tient d'autre part pas compte de l'obliquité de la dent, ni de l'augmentation de la résistance du cuivre avec la température.

Une solution encore très simple correspond à

$$(b) \qquad \mathrm{K} = 0, \quad \delta \neq 0, \quad \alpha = 0$$

qui, comparée à la solution (a), permet de se rendre compte de l'influence de l'obliquité de la dent.

Nous pouvons encore faire la supposition :

$$(c) \qquad \mathrm{K} = 0, \quad \delta = 0, \quad \alpha \neq 0,$$

qui, comparée à la combinaison (a), fait valoir l'influence de l'augmentation de la résistance avec la température.

La combinaison qui se rapproche le plus de la vérité est la suivante :

$$(d) \qquad \mathrm{K} \neq 0, \quad \delta = 0, \quad \alpha \neq 0.$$

Elle permet de se rendre compte de l'influence sur le refroidissement du cuivre des faces étroites de l'encoche, vers l'entrefer et vers le canal de ventilation. Cette combinaison tient compte de l'augmentation de la résistance du cuivre avec la température, mais admet que la dent est à faces parallèles, ce qui, vu l'hypothèse admise, ne doit pas avoir une grande influence sur le résultat, à condition de choisir une valeur moyenne convenable pour l'épaisseur de la dent. L'équation

Digitized by Google

différentielle répondant à cette combinaison est du quatrième ordre, à coefficients constants.

En effectuant les calculs pour les quatre combinaisons, nous pouvons connaître l'influence des différents facteurs sur l'échauffement du cuivre.

β. *Equations différentielles spéciales et leurs intégrations.*

Nous obtenons pour les quatre combinaisons indiquées, les équations différentielles et les intégrations suivantes :

Combinaison a.

$$\frac{d^2\theta_0}{dx^2} = -\frac{1}{K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\frac{1}{c},$$

dont l'intégrale est

$$\theta_0 = -\frac{1}{2K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\frac{x^2}{c} + C_1 x + C_2, \tag{5}$$

C_1 et C_2 étant des constantes à déterminer par les conditions aux limites.

Combinaison b.

$$\frac{d^2\theta_0}{dx^2} = -\frac{1}{K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \cos\delta}\frac{1}{c + 2x \operatorname{tg}\delta},$$

que nous intégrons comme suit :

$$\frac{d\theta_0}{dx} = -\frac{1}{2K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta}\log_e (c + 2x \operatorname{tg}\delta) + C_1, \tag{6a}$$

et

$$\theta_0 = -\frac{1}{2K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta}\left[\left(x + \frac{c}{2\operatorname{tg}\delta}\right)\log_e (c + 2x \operatorname{tg}\delta) - x\right] + C_1 x + C_2, \tag{6b}$$

C_1 et C_2 étant encore des constantes à déterminer par les conditions aux limites.

Combinaison c.

$$-\left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)\frac{d^2\theta_0}{dx^2} - \frac{1}{K_f}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\frac{1}{c}\theta_0 = \frac{1}{K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\frac{1}{c},$$

que nous écrivons

$$\frac{d^2\theta_0}{dx^2} + \alpha P\theta_0 = -P.$$

Soit θ'_0 une température définie par

$$\theta_0 = \theta'_0 - \frac{P}{\alpha P} = \theta'_0 - \frac{1}{\alpha}.$$

Digitized by Google

En substituant, l'équation différentielle devient

$$\frac{d^2\theta'_0}{dx^2} + \alpha P \theta'_0 = 0,$$

dont l'équation caractéristique est $y^2 + \alpha P = 0$
ce qui donne

$$y = \pm\sqrt{-\alpha P},$$

αP étant essentiellement positif on a

$$\theta_0 = C_1 \cos\sqrt{\alpha P}\,x + C_2 \sin\sqrt{\alpha P}\,x - \frac{1}{\alpha}, \tag{7}$$

avec

$$P = \frac{\frac{1}{K_f}\,\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\,\frac{1}{c}}{1 - \frac{e}{2K_r}\,\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}}, \tag{8}$$

les constantes C_1 et C_2 étant à déterminer par les conditions aux limites.

Combinaison d.

$$\frac{d^4\theta_0}{dx^4} - \frac{2K_r}{K}\,\frac{1}{ed_0}\left(1 - \frac{e}{2K_r}\,\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0} + \frac{K}{K_f}\,\frac{d_0}{c}\right)\frac{d^2\theta_0}{dx^2} - \frac{2K_r}{KK_f}\,\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\,\frac{1}{ed_0 c}\,\theta_0 = \frac{2K_r}{KK_f}\,\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\,\frac{1}{ed_0 c},$$

que nous écrivons

$$\frac{d^4\theta_0}{dx^4} - M\frac{d^2\theta_0}{dx^2} - \alpha N\theta_0 = N. \tag{9}$$

Appelons un instant θ'_0 une température définie par

$$\theta_0 = \theta'_0 - \frac{N}{\alpha N} = \theta'_0 - \frac{1}{\alpha}.$$

L'équation différentielle devient

$$\frac{d^4\theta'_0}{dx^4} - M\frac{d^2\theta'_0}{dx^2} - \alpha N\theta'_0 = 0,$$

dont l'équation caractéristique est

$$a^4 - Ma^2 - \alpha N = 0$$

ce qui donne

$$a = \pm\sqrt{\frac{M}{2} \pm \sqrt{\frac{M^2}{4} + \alpha N}},$$

et finalement pour θ'_0

$$\theta'_0 = A_1 \cos h\, a_1 x + B_1 \sin h\, a_1 x + A_2 \cos a_2 x + B_2 \sin a_2 x$$

et pour θ_0

$$\theta_0 = A_1 \cosh a_1 x + B_1 \sin h\, a_1 x + A_2 \cos a_2 x + B_2 \sin a_2 x - \frac{1}{\alpha} \tag{10}$$

Digitized by Google

avec

$$(11\,a)\qquad a_1 = \sqrt{\frac{M}{2} + \sqrt{\frac{M^2}{4} + \alpha N}}, \qquad a_2 = \sqrt{\sqrt{\frac{M^2}{4} + \alpha N} - \frac{M}{2}}$$

et

$$(11\,b)\qquad M = \frac{2K'_r}{K}\frac{1}{ed_0}\left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0} + \frac{K}{K_f}\frac{d_0}{c}\right),$$

$$(11\,c)\qquad N = \frac{2K_r}{KK_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\frac{1}{ed_0 c}.$$

Les quatre constantes A_1, B_1, A_2, B_2 sont données par les conditions aux limites; nous les déterminons plus loin.

γ. *La température θ du fer sur la hauteur du cuivre.*

On a directement de (1)

$$(12)\qquad \theta = -\frac{K}{2K_r} ed_0 \cos^2\delta \frac{d^2\theta_0}{dx^2} + \left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)\theta_0 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0},$$

ce qui donne pour les différentes combinaisons :

En tenant compte de (5), pour la combinaison (*a*)

$$(13\,a)\qquad \theta = \theta_0 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0} = -\frac{1}{2K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\frac{x^2}{c} + C_1 x + C_2 - \frac{e}{2K'_r}\frac{I^2\rho}{s'_0 b_0}.$$

En tenant compte de (6 *b*), pour la combinaison (*b*)

$$(13\,b)\qquad \theta = \theta_0 - \frac{e}{2K'_r}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0} = -\frac{1}{2K_f}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta}\left[\left(x + \frac{c}{2\operatorname{tg}\delta}\right)\log_e(c + 2x\operatorname{tg}\delta) - x\right]$$
$$+ C_1 x + C_2 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}.$$

Pour la combinaison (*c*), en tenant compte de (7)

$$\theta = \left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)\theta_0 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0},$$

$$\theta = \left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)\left(C_1 \cos\sqrt{\alpha P}.x + C_2 \sin\sqrt{\alpha P}.x - \frac{1}{\alpha}\right) - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0},$$

$$(13\,c)\qquad \theta = \left(1 - \frac{e}{2K'_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)(C_1 \cos\sqrt{\alpha P}.x + C_2 \sin\sqrt{\alpha P}.x) - \frac{1}{\alpha}.$$

Pour la combinaison (*d*)

$$\theta = -\frac{K}{2K_r} ed_0 \frac{d^2\theta_0}{dx^2} + \left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)\theta_0 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}.$$

Or on a de (10)

$$\frac{d^2\theta_0}{dx^2} = a_1^2 A_1 \cosh a_1 x + a_1^2 B_1 \sinh a_1 x - a_2^2 A_2 \cos a_2 x - a_2^2 B_2 \sin a_2 x,$$

ce qui donne

Digitized by Google

$$(13\,d)\quad \left\{\begin{aligned}\theta = &-\frac{K}{2K_r} e d_0' a_1^2 A_1 \cosh a_1 x + a_1^2 B_1 \sinh a_1 x - a_2^2 A_2 \cos a_2 x - a_2^2 B_2 \sin a_2 x)\\ &+\left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{l^2 \rho \alpha}{s_0 b_0}\right)(A_1 \cosh a_1 x + B_1 \sinh a_1 x + A_2 \cos a_2 x + B_2 \sin a_2 x)\\ &-\frac{1}{\alpha}.\end{aligned}\right.$$

δ. *La température 0′ du fer sur la hauteur du canal de ventilation.*

Il est toujours possible de remplacer le canal de ventilation, à faces parallèles, par un canal dont les faces sont parallèles à l'axe de la dent, sans que pour cela les conditions réelles de refroidissement soient sensiblement modifiées; on est ainsi affranchi de l'obliquité de la dent dans la recherche de la température 0′. La dent a dans ces conditions la largeur c sur la hauteur du canal de ventilation, et la paroi réelle est remplacée par la ligne en pointillé de la fig. 15.

Nous faisons l'hypothèse que toute la chaleur pénétrant dans cette partie de la dent s'écoule par les parois du canal de ventilation, en d'autres termes que la base de la dent est imperméable à la chaleur. Les températures que nous calculerons de cette façon seront trop élevées, car une certaine partie de la chaleur produite dans le cuivre s'écoule par la base de la dent dans le corps de rotor, et est rayonnée par la partie de la surface du rotor ne possédant pas d'enroulement.

Nous avons pour la température 0′ la relation suivante

$$K_f c \frac{d^2 0'}{d r_1^2}\, dr_1 = 2 h_2 (0' - 0_V) dr_1$$

ou

$$\frac{d^2 0'}{d r_1^2} - \frac{2 h_2}{K_f}\frac{1}{c} 0' + \frac{2 h_2}{K_f}\frac{1}{c} 0_V = 0,$$

dont l'intégrale est

$$0' = C' \cosh \sqrt{\frac{2 h_2}{K_f}\frac{1}{c}}\, r_1 + C'' \sinh \sqrt{\frac{2 h_2}{K_f}\frac{1}{c}}\, r_1 + 0_V,$$

C′ et C″ étant les constantes d'intégration à déterminer par les conditions aux limites. Or, nous venons de dire que nous admettons qu'aucune chaleur ne pénètre à travers la base de la dent. On a donc, pour

$$r_1 = 0$$

$$\frac{d0'}{dr_1} = 0,$$

ce qui donne $C'' = 0$. On obtient ainsi pour 0′ l'expression

$$(14)\qquad 0' = C' \cosh \sqrt{\frac{2 h_2}{K_f}\frac{1}{c}}\, r_1 + 0_V,$$

Digitized by Google

ou pour simplifier

$$\theta' = C' \cosh a' \eta + \theta_V, \tag{14 a}$$

en désignant par a' l'expression définie par

$$a'^2 = \frac{2h_2}{K_f} \frac{1}{c}. \tag{15}$$

On peut tenir compte dans une certaine mesure de la chaleur qui passe à travers la base de la dent et de celle qui est éventuellement emmenée dans les évents, en donnant à h_2 une valeur plus élevée que celle qui correspondrait aux conditions réelles de vitesse d'air dans le canal de ventilation.

ε. *Les conditions aux limites et les constantes d'intégration.*

Dans les cas *a*, *b* et *c*, nous avons à effectuer la recherche de trois constantes d'intégration, que nous avons désignées par C_1, C_2 et C'; dans la combinaison *d* nous avons cinq constantes à déterminer, A_1, B_1, A_2, B_2 ainsi que C'.

Les trois conditions aux limites, communes aux quatre cas, sont données, d'une part, par les conditions de raccordement à la base de la dent, qui demandent que pour $x = 0$ et $\eta = b'$ on ait

$$\theta'_{\eta=b'} = \theta_{x=0} \tag{16 a}$$

et

$$\left(\frac{d\theta'}{d\eta}\right)_{\eta=b'} = \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=0}, \tag{16 b}$$

et d'autre part par les conditions de refroidissement au sommet de la dent, d'après lesquelles on a, pour $x = b$

$$-K_f \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{x=b} = h_1 (\theta_{x=b} - \theta_e). \tag{16 c}$$

Pour la combinaison (*d*) il faut encore tenir compte des conditions de refroidissement de l'encoche vers l'entrefer et vers le canal de ventilation. On a

$$-K'_r \left(\frac{d\theta_0}{d\xi}\right)_{\xi=b_0+e''} = h'_r (\theta_{0\xi=b_0+e''} - \theta_e), \tag{16 d}$$

avec

$$h'_r = \frac{h_1 K'_r}{K'_r + (e' + b'_0) h_1}, \tag{17 a}$$

et

$$+K''_r \left(\frac{d\theta_0}{d\xi}\right)_{\xi=e''} = h''_r (\theta_{0\xi=e''} - \theta_V), \tag{16 e}$$

Digitized by Google

avec

$$h'_r = \frac{h_2 K''_r}{K''_r + e'' h_2}. \tag{17 b}$$

Nous allons examiner successivement les trois cas.

Combinaison a.

On tire de (16 *a*), et (16 *b*) en connexion avec (13 *a*) et (14 *a*)

$$C' \cosh a'b' + \theta_V = C_2 - \frac{e}{2K'_r} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0}. \tag{18 a}$$

$$a'C' \sinh a'b' = C_1 \tag{18 b}$$

La relation (16 *c*) donne avec (13 *a*)

$$C_1(K_f + h_1 b) + h_1 C_2 = \frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\left(\frac{b}{c} + \frac{h_1 b^2}{2K_f c} + \frac{e h_1}{2K_r}\right) + h_1 \theta_e. \tag{18 c}$$

On obtient, en remplaçant, en (18 *a*) C′ par sa valeur tirée de (18 *b*)

$$C_2 = C_1 \frac{\operatorname{cotgh} a'b'}{a'} + \frac{e}{2K_r} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0} + \theta_V, \tag{19 a}$$

ce qui, introduit en (18 *c*), permet de déterminer C_1 par

$$C_1\left(K_f + h_1 b + \frac{h_1}{a'} \operatorname{cotgh} a'b'\right) = \frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\left(\frac{b}{c} + \frac{h_1 b^2}{2K_f c}\right) - h_1(\theta_V - \theta_e), \tag{19 b}$$

d'où l'on tire C_2 par (19 *a*) et C′ par (18 *b*).

Combinaison b.

On a de nouveau de (16 *a*), (16 *b*), et (14 *a*), en connexion avec (13 *b*)

$$C' \cosh a'b' + \theta_V = -\frac{c \log_e c}{4K_f} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta \operatorname{tg}\delta} + C_2 - \frac{e}{2K_r} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0}.$$

$$C' \cosh a'b' + \theta_V = -\frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\left(\frac{e}{2K_r} + \frac{c \log_e c}{4K_f} \frac{1}{\sin\delta \operatorname{tg}\delta}\right) + C_2, \tag{20 a}$$

et avec (6 *a*)

$$a'C' \sinh a'b' = -\frac{1}{2K_f} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta} \log_e c + C_1. \tag{20 b}$$

La relation (16 *c*) donne avec (13 *b*) et (6 *a*)

$$\frac{1}{2} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta} \log_e (c + 2b \operatorname{tg}\delta) - K_f C_1 = h_1 C_1 b + h_1 C_2 - h_1 \theta_e$$
$$- h_1 \frac{e}{2K_r} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0} - \frac{h_1}{2K_f} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta}\left[\left(b + \frac{c}{2 \operatorname{tg}\delta}\right)\log_e (c + 2b \operatorname{tg}\delta) - b\right].$$

$$C_1(K_f + h_1 b) + h_1 C_2 = \frac{1}{2} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta}\left\{\log_e (c + 2b \operatorname{tg}\delta)\left[1 + \frac{h_1}{K_f}\left(b + \frac{c}{2 \operatorname{tg}\delta}\right)\right] - \frac{h_1 b}{K_f}\right\}$$
$$+ h_1\left(\theta_e + \frac{e}{2K_r} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0}\right) \tag{20 c}$$

Digitized by Google

Le système des trois équations (20) permet de calculer les trois constantes.

Combinaison c.

On combine encore (16 *a*) et (16 *b*) avec (13 *c*), ce qui donne

$$(21\,a)\qquad C' \cosh a'b' + \theta_V = \left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right) C_1 - \frac{1}{\alpha},$$

et

$$(21\,b)\qquad a'C' \sinh a'b' = \left(1 - \frac{e}{2K'_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)\sqrt{\alpha P}\, C_2.$$

De (16 *c*) on tire

$$(21\,c)\quad -K_f\left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)\sqrt{\alpha P}\,(-C_1 \sin\sqrt{\alpha P}\,b + C_2 \cos\sqrt{\alpha P}\,b)$$
$$= h_1\left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)(C_1 \cos\sqrt{\alpha P}\,b + C_2 \sin\sqrt{\alpha P}\,b) - h_1\left(\frac{1}{\alpha} + \theta_e\right)$$

Les relations (21) permettent de calculer les trois constantes, mais nous n'entrerons pas dans le détail de ces calculs.

Combinaison d.

On tire de (16 *a*) et (16 *b*), en combinaison avec (14 *a*) et (13 *d*)

$$(22\,a)\quad C' \cosh a'b' + \theta_V = -\frac{K}{2K_r}\, ed_0(a_1^2 A_1 - a_2^2 A_2)$$
$$+\left(1 - \frac{e}{2K'_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)(A_1 + A_2) - \frac{1}{\alpha},$$

et

$$(22\,b)\quad a'C' \sinh a'b' = -\frac{K}{2K_r}\, ed_0(a_1^3 B_1 - a_2^3 B_2)$$
$$+\left(1 - \frac{e}{2K'_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)(a_1 B_1 + a_2 B_2).$$

On a de plus de (16 *c*), en connexion avec (13 *d*)

$$(22\,c)\quad \frac{KK_f}{2K_r}\, ed_0(a_1^3 A_1 \sinh a_1 b + a_1^3 B_1 \cosh a_1 b + a_2^3 A_2 \sin a_2 b - a_2^3 B_2 \cos a_2 b)$$
$$-K_f\left(1 - \frac{e}{2K'_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)(a_1 A_1 \sinh a_1 b + a_1 B_1 \cosh a_1 b - a_2 A_2 \sin a_2 b + a_2 B_2 \cos a_2 b)$$
$$= -h_1\frac{K}{2K_r}\, ed_0(a_1^2 A_1 \cosh a_1 b + a_1^2 B_1 \sinh a_1 b - a_2^2 A_2 \cos a_2 b - a_2^2 B_2 \sin a_2 b)$$
$$+h_1\left(1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0}\right)(A_1 \cosh a_1 b + B_1 \sinh a_1 b + A_2 \cos a_2 b + B_2 \sin a_2 b)$$
$$-h_1\left(\frac{1}{\alpha} + \theta_e\right).$$

La relation (16 *d*) donne en combinaison avec (10) et en tenant

Digitized by Google

compte de ce que pour $\delta = 0$ on a

$$x = \xi,$$

$$(23\,a) \qquad -K_r''\left(\frac{d\theta_0}{dx}\right)_{x=(b_0+e'')} = h_r'(\theta_0 - \theta_e)_{x=(b_0+e'')}.$$

et de (16 c)

$$(23\,b) \qquad K_r''\left(\frac{d\theta_0}{dx}\right)_{x=e''} = h_r''(\theta_0 - \theta_V)_{x=e''}.$$

On tire de (23 a)

$$(23\,d) \qquad \begin{aligned} &-K_r'[a_1A_1 \sinh a_1(b_0+e'') + a_1B_1 \cosh a_1(b_0+e'') \\ &\quad - a_2A_2 \sin a_2(b_0+e'') + a_2B_2 \cos a_2(b_0+e'')] \\ &= h_r'[A_1 \cosh a_1(b_0+e'') + B_1 \sinh a_1(b_0+e'') \\ &\quad + A_2 \cos a_2(b_0+e'') + B_2 \sin a_2(b_0+e'')] - h_r'\left(\frac{1}{\alpha} + \theta_r\right), \end{aligned}$$

et de même de (23 b)

$$(23\,e) \qquad \begin{aligned} &K_r''[a_1A_1 \sinh a_1e'' + a_1B_1 \cosh a_1e'' - a_2A_2 \sin a_2e'' + a_2B_2 \cos a_2e'') \\ &= h_r''(A_1 \cosh a_1e'' + B_1 \sinh a_1e'' + A_2 \cos a_2e'' + B_2 \sin a_2e'') \\ &\quad - h_r''\left(\frac{1}{\alpha} + \theta_V\right). \end{aligned}$$

Le système des cinq équations (22) permet de calculer les cinq constantes A_1, B_1, A_2, B_2, C'. Nous n'expliciterons pas ce calcul qui se fait aisément dans les applications numériques, mais qui est toujours très long.

10. *Application à un cas pratique des résultats obtenus dans le paragraphe 9. Détermination de la température dans une encoche de rotor d'un turboalternateur.*

Les dimensions de l'encoche prise comme exemple d'application sont

$b = 11{,}5$ cm, $b' = 4{,}3$ cm, $b_0 = 8{,}73$ cm, $b_0' = 1{,}5$ cm
$d_0 = 2{,}4$ cm, $c = 2$ cm.

Pour les cas où $\delta = 0$ on a pris pour c la largeur moyenne de la dent, soit $c = 3{,}35$ cm

$e = 0{,}15$ cm d'isolation plus une gaine de laiton de 0,02 cm plus une couche d'air de 0,03 cm $= 0{,}20$ cm ;

$e' = 0{,}3$ cm d'isolation plus 0,2 cm de laiton $= 0{,}5$ cm ;

$e'' = 0{,}15$ d'isolation plus 0,02 cm de laiton plus une cale en fer de 0,6 cm $= 0{,}77$ cm.

L'épaisseur de l'isolation entre les conducteurs est de 0,047 cm, l'épaisseur des conducteurs de 0,29 cm. Soient encore

Digitized by Google

$\delta = 6°41' = 0{,}11665$ radian, ($\sin\delta = 0{,}1164$, $\cos\delta = 0{,}9932$, $\operatorname{tg}\delta = 0{,}1172$),

$$s_0 = 26(0{,}29 \times 2{,}4) = 18{,}1 \text{ cm}^2.$$

Nous avons de plus

$$I = 26 \times 244 = 6350 \text{ ampères},$$

$$\rho_{20} = 1{,}722 \times 10^{-6} \text{ ohm-cm}, \qquad \alpha_{20} = 3{,}93 \times 10^{-3} \frac{1}{1^\circ}$$

On rapporte toutes les températures à celle de l'air, supposée égale à 20°C, qui entre dans le ventilateur. L'échauffement moyen de l'air circulant dans le rotor et entourant celui-ci, provenant aussi bien des pertes par ventilation que des pertes par effet Joule, est admis égal à 15°C. Nous posons donc

$$\theta_e = \theta_V = 15°\text{C}.$$

Conductibilités thermiques résultantes.

Nous prenons pour les conductibilités des matières composantes, les valeurs suivantes :

Pour la gaine isolante 2×10^{-3} $\dfrac{w}{1^\circ - \text{cm}}$;

Pour l'air enfermé $0{,}23 \times 10^{-3}$ $\dfrac{w}{1^\circ - \text{cm}}$;

Pour le laiton 1,00 $\dfrac{w}{1^\circ - \text{cm}}$;

Pour le fer de la cale 0 67 $\dfrac{w}{1^\circ - \text{cm}}$;

Pour l'acier du rotor $K_f = 0{,}45$ $\dfrac{w}{1^\circ - \text{cm}}$;

Pour le cuivre 3,84 $\dfrac{w}{1^\circ - \text{cm}}$.

On obtient ainsi

$$\frac{0{,}29 + 0{,}047}{K} = \frac{0{,}29}{3{,}84} + \frac{0{,}047}{0{,}002} \quad \text{d'où} \quad K = 14{,}3 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}} ;$$

$$\frac{e}{K_r} = \left(\frac{0{,}15}{2} + \frac{0{,}02}{1000} + \frac{0{,}03}{0{,}23}\right)10^3 \quad \text{d'où} \quad K_r = 0{,}93 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}} ;$$

$$\frac{e' + b'_0}{K'_r} = \left(\frac{0\,3}{2} + \frac{1{,}7}{1\,000}\right)10^3 \quad \text{d'où} \quad K'_r = 13{,}2 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}} ;$$

$$\frac{e''}{K''_r} = \left(\frac{0{,}15}{2} + \frac{0{,}02}{1000} + \frac{0{,}6}{670}\right)10^3 \quad \text{d'où} \quad K_r = 10{,}1 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}.$$

Coefficients d'émission de chaleur.

Nous prenons

$$h_r = 17 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2},$$

Digitized by Google

correspondant à la vitesse périphérique du rotor qui est de 103.5 m : s.

La vitesse de l'air dans le canal de ventilation est de 60 m : s. La valeur correspondante de h serait $16 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \mathrm{cm}^2}$, mais, pour tenir compte de la surface rayonnante du rotor qui ne comporte pas d'enroulement, nous augmentons cette valeur à

$$30 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \mathrm{cm}^2}.$$

On trouve ainsi

$$h'_r = \frac{17 \times 13{,}2 \times 10^{-3}}{13{,}2 + 17 \times 2} = 2{,}55 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \mathrm{cm}^2},$$

$$h''_r = \frac{30 \times 10{,}1 \times 10^{-3}}{10{,}1 + 30 \times 0{,}77} = 8{,}17 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \mathrm{cm}^2}.$$

Les calculs donnent

Pour la combinaison a : $K = 0, \quad \alpha = 0, \quad \delta = 0$

$$\frac{1}{2K_f} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0} \frac{1}{c} = 0{,}146 \frac{1^\circ}{\mathrm{cm}^2}, \qquad \frac{e}{2K_r} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0} = 47{,}4^\circ\mathrm{C},$$

et les constantes suivantes :

$$a' = 0{,}1995\ \mathrm{cm}^{-1}, \quad C_1 = 2{,}4 \frac{1^\circ}{\mathrm{cm}}, \quad C_2 = 79{,}7^\circ\mathrm{C}, \quad C' = 12{,}45^\circ\mathrm{C},$$

ce qui donne pour les trois fonctions θ les valeurs

$$\theta_0 = 79{,}7 + 2{,}4\,x - 0{,}146x^2 \qquad [0{,}77 \leqslant x \leqslant 9{,}5],$$
$$\theta = \theta_0 \quad 47{,}4 \qquad [0 \leqslant x \leqslant 11{,}5],$$
$$\theta' = 15 + 12{,}45 \cosh 0{,}1995\eta_1 \qquad [0 \leqslant \eta_1 \leqslant 4{,}3].$$

Pour la combinaison b : $K = 0, \quad \alpha = 0, \quad \delta \neq 0$

$$\frac{1}{2K_f} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta} = 4{,}2 \frac{1^\circ}{\mathrm{cm}}, \qquad \frac{e}{2K_r} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0} = 47{,}4^\circ\mathrm{C}$$

$$\frac{c}{2\,\mathrm{tg}\,\delta} = 8{,}54\ \mathrm{cm}, \qquad 2\,\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}2344.$$

et les constantes

$$a' = 0\ 256\ \mathrm{cm}^{-1}, \quad C_1 = 5{,}66 \frac{1^\circ}{\mathrm{cm}}, \quad C_2 = 100{,}3^\circ\mathrm{C}, \quad C' = 7{,}9^\circ\mathrm{C},$$

$$C_1 + \frac{1}{2K_f} \frac{I^2\rho}{s_0 b_0 \sin\delta} = 9{,}86 \frac{1^\circ}{\mathrm{cm}},$$

et on obtient pour les trois fonctions θ les expressions :

$$\theta_0 = 100{,}3 + 9{,}86x - 4{,}2(8{,}54 + x)\log_e(2 + 0{,}2344x)$$
$$[0{,}764 \leqslant x \leqslant 9{,}43],$$
$$\theta = \theta_0 - 47{,}4 \qquad [0 \leqslant x \leqslant 11{,}5],$$
$$\theta' = 15 + 7{,}9 \cosh 0{,}258\eta_1 \qquad [0 \leqslant \eta_1 \leqslant 4{,}3].$$

Digitized by Google

Pour la combinaison c : $K = 0, \quad \alpha \neq 0, \quad \delta = 0$

$$1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0} = 0{,}814,$$

et les constantes

$$m = 0{,}0376\ \text{cm}^{-1}, \quad a' = 0{,}1995\ \text{cm}^{-1},$$
$$C_1 = 362°C, \quad C_2 = 113{,}2°C, \quad C' = 18°C$$

et

$$0.814C_1 = 294°C, \quad 0{,}814C_2 = 92°C.$$

Les températures θ sont donc données par les fonctions :

$$\theta_0 = 362 \cos 0{,}0376x + 113{,}2 \sin 0{,}0376x - 254{,}5 \quad [0{,}77 \leqslant x \leqslant 9{,}5],$$
$$\theta = 294 \cos 0{,}0376x + 92 \sin 0{,}0376x - 254{,}5 \quad [0 \leqslant x \leqslant 11{,}5],$$
$$\theta' = 15 + 18 \cosh 0{,}1995\eta \quad [0 \leqslant \eta \leqslant 4{,}3].$$

Pour la combinaison d : $K \neq 0, \quad \alpha \neq 0, \quad \delta = 0$

$1 - \frac{e}{2K_r}\frac{I^2\rho\alpha}{s_0 b_0} = 0{,}814$, expression que nous désignons par F,

$\frac{ed_0 K}{2K_r} = 3{,}69\ \text{cm}^2$, expression que nous désignons par H,

et les constantes

$$a_1 = 0{,}4776\ \text{cm}^{-1}, \quad a_2 = 0{,}03692\ \text{cm}^{-1}, \quad a' = 0{,}1995\ \text{cm}^{-1},$$
$$A_1 = -58{,}20°C, \quad B_1 = 57{,}62°C, \quad A_2 = 344{,}98°C, \quad B_2 = 92{,}76°C,$$
$$C' = 10{,}534°C.$$

Les facteurs rentrant dans l'expression de θ sont :

$$(F - a_1^2 H)A_1 = 1{,}618°C ; \qquad (F - a_1^2 H)B_1 = 1{,}602°C ;$$
$$(F + a_2^2 H)A_2 = 282{,}54°C ; \qquad (F + a_2^2 H)B_2 = 75{,}97°C.$$

Les températures sont données par les fonctions

$$\theta_0 = -58{,}20 \cosh 0{,}4776x + 57{,}62 \sinh 0{,}4776x + 344{,}98 \cos 0{,}03692x$$
$$+ 92\ 76 \sin 0{,}03692x - 254{,}5\ [0{,}77 \leqslant x \leqslant 9{,}5],$$
$$\theta = 1{,}618 \cosh 0{,}4776x + 1{,}602 \sinh 0{,}4776x + 282{,}54 \cos 0{,}03692x$$
$$+ 75.97 \sin 0{,}03692x - 254{,}5\ [0 \leqslant x \leqslant 11{,}5]$$
$$\theta' = 15 + 10{,}534 \cosh 0{,}1995\eta\ [0 \leqslant \eta \leqslant 4{,}3].$$

Les résultats de ces calculs ont été portés sur les courbes *a*, *b*, *c* et *d* de la figure 16.

Comparons d'abord les températures θ_0 du cuivre des courbes *a* et *b*, pour lesquelles on a $K = 0$ et $\alpha = 0$, mais où l'on a admis pour la première une dent à largeur constante, égale à la largeur moyenne de la dent, et où pour la deuxième on tient compte de l'obliquité de la dent. Nous remarquons que ces courbes donnent des températures peu différentes, un peu supérieures pour *a* à celles de la

Digitized by Google

courbe b ; on peut en conclure que d'avoir admis une épaisseur de la dent égale à la moyenne tient assez bien compte des faits.

La courbe c montre qu'en introduisant l'augmentation de la résistance du cuivre avec la température on obtient des valeurs sensiblement plus élevées. Il faut ajouter que nous avons admis dans nos

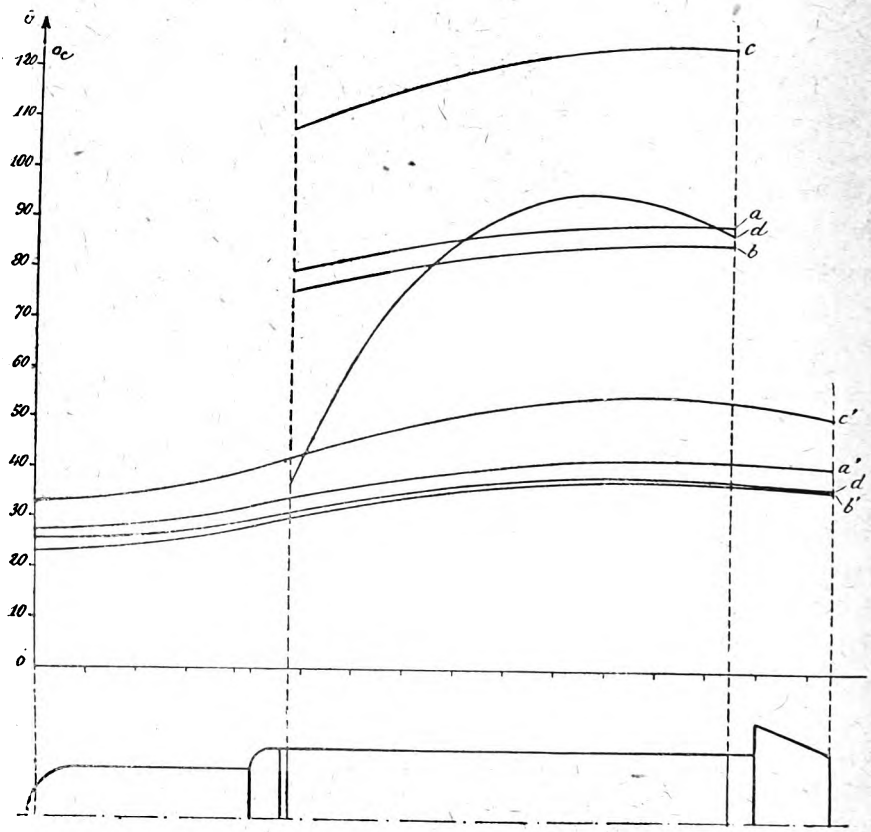


Fig. 16. — Courbes de répartition de la température dans un élément du rotor d'un turbo-alternateur ; les courbes a, b, c, d, se rapportent au cuivre et les courbes a', b', c', d' au fer.

calculs comme valeur constante de α, celle correspondant à la température de départ de 20°C, ce qui donne nécessairement des résultats trop faibles; mais il nous importait avant tout de comparer le cas réel de la dent oblique au cas d'une largeur constante de la dent.

La comparaison entre les courbes c et d montre l'influence de la conductibilité longitudinale K de la combinaison cuivre et isolant dans l'encoche et l'action refroidissante des côtés de l'encoche, dont l'un fait face à l'entrefer et l'autre au canal de ventilation, et on re-

Digitized by Google

marque que cette action est considérable. La solution du cas (*d*) qui en tient compte est malheureusement très longue à cause de la recherche des cinq constantes.

V. — Problèmes a deux dimensions.

Nous en venons maintenant aux problèmes à deux dimensions, dont les solutions diffèrent entièrement de celles des problèmes précédents; à de très rares exceptions près elles ne peuvent plus être exprimées sous forme finie et pour les intégrations il est nécessaire d'avoir recours à des séries. C'est en étudiant des questions de ce genre que Fourier a trouvé ses célèbres séries, et nous ne pouvons pas mieux faire que d'exposer deux cas traités par ce grand savant. Cet exposé nous apprendra à connaître les raisonnements qui ont guidé Fourier, et nous facilitera nos développements futurs.

11. — *Propagation de la chaleur dans un solide rectangulaire infini (Séries de Fourier ordinaires).*

Nous exposerons la solution de ce premier problème en reproduisant presque intégralement les paragraphes 164 à 169 du traité de Fourier. Voici comment s'exprime l'illustre auteur :

« Supposons une masse solide homogène contenue entre deux plans verticaux B et C parallèles et infinis, et divisons-la en deux parties par un plan A, perpendiculaire aux deux autres (fig. 12) ; nous allons considérer les températures de la masse BAC comprise entre les trois plans infinis A, B, C. On suppose que la partie B′ AC′ du solide infini est une source constante de chaleur, c'est-à-dire que tous ses points sont retenus à la température 1, qui ne peut jamais devenir moindre ni plus grande. Quant aux deux solides latéraux compris, l'un entre le plan C et le plan A prolongé, l'autre entre le plan B et le plan A prolongé, tous leurs points ont une température constante O, et une cause extérieure leur conserve toujours cette même température ».

« Si le solide considéré BAC a la température initiale O, la chaleur passera successivement du foyer A dans le solide BAC; elle s'y propagera dans le sens de la longueur qui est infinie et en même temps elle se détournera vers les masses froides B et C qui en absorberont une grande partie. Les températures du solide BAC s'élèveront de plus en plus, il s'agit de connaître l'état final et constant dont l'état variable se rapproche de plus en plus. »

Digitized by Google

« On suppose donc qu'une lame rectangulaire d'une longueur infinie est échauffée par son extrémité A et conserve dans tous les points de cette base une température constante 1, tandis que chacune des deux arêtes infinies B et C, perpendiculaires à A, est assujettie dans tous ses points à une température constante O; il s'agit de déterminer quelles doivent être les températures stationnaires de chaque point de la lame. Le solide considéré est formé par la superposition d'une infinité de lames pareilles à la précédente ».

Aucune chaleur ne passe donc dans le sens parallèle au plan A; la recherche de la répartition de température se réduit donc dans ce cas à un problème à deux dimensions.

« On prend pour l'axe des y la droite qui partage la lame en deux moitiés; les coordonnées de chaque point M sont x et y; enfin on représente la largeur de la lame par $2e$ ou pour abréger les calculs, par π, valeur de la demi-circonférence. »

« L'équation qui convient à la question actuelle est celle-ci

$$(1) \qquad \frac{\partial^2 0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 0}{\partial y^2} = 0.$$

« La fonction $\varphi(x, y)$ qui représente l'état permanent du solide BAC, doit :

1° Satisfaire à l'équation (1).

2° Devenir nulle lorsqu'on substitue $-\frac{\pi}{2}$ ou $+\frac{\pi}{2}$ au lieu de x, quelle que soit d'ailleurs la valeur de y.

3° Etre égale à l'unité, si l'on suppose $y = 0$ et si l'on attribue à x une valeur quelconque comprise entre $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$.

Il faut ajouter que cette fonction $\varphi(x, y)$ doit devenir extrêmement petite lorsqu'on donne à y une valeur très grande, puisque toute la chaleur sort du seul foyer A ». Nous pouvons encore dire que la fonction y doit être paire en x pour raison de symétrie.

« On cherchera en premier lieu les plus simples fonctions de x et y qui puissent satisfaire à l'équation (1); ensuite on donnera à cette valeur de 0 une expression plus générale, afin de remplir toutes les conditions énoncées ».

« On écrira

$$0 = F(x)f(y);$$

substituant dans l'équation (1) et désignant $\frac{\partial^2 F(x)}{\partial x^2}$ par $F''(x)$ et $\frac{\partial^2 f(y)}{\partial y^2}$ par $f''(y)$, on aura

Digitized by Google

$$\frac{F''(x)}{F(x)} + \frac{f''(y)}{f(y)} = 0,$$

on pourra donc supposer

$$\frac{F''(x)}{F(x)} = -m^2 \qquad \text{et} \qquad \frac{f''(y)}{f(y)} = +m^2,$$

m étant une constante quelconque; et, comme on se propose seulement de trouver une valeur particulière de θ, on déduira des équations précédentes

$$F(x) = \cos mx, \quad f(y) = e^{-my} \text{ ».}$$

« On ne pourrait point supposer que m est un nombre négatif, et l'on doit nécessairement exclure toutes les valeurs particulières de θ où il entrerait des termes tels que e^{my}, m étant un nombre positif, parce que la température θ ne peut point devenir infinie lorsque y est infiniment grand. En effet, la chaleur n'étant fournie que par la source constante A, il ne peut en parvenir qu'une portion extrêmement petite dans les points de l'espace qui sont très éloignés du foyer. Le reste se détourne de plus en plus vers les arêtes infinies B et C et se perd dans les masses froides qu'elles terminent ».

« L'exposant m qui entre dans la fonction $\cos mx\, e^{-my}$ n'est pas déterminé, et l'on peut choisir pour cet exposant un nombre positif quelconque; mais, pour que θ devienne nulle en faisant $x = -\frac{\pi}{2}$ ou $x = +\frac{\pi}{2}$, quelle que soit y, on prendra pour m un des termes de la suite 1, 3, 5, 7,...; par ce moyen la seconde condition sera remplie ».

« On formera facilement une valeur plus générale de θ en ajoutant plusieurs termes semblables aux précédents, et l'on aura

(2) $\theta = ae^{-y}\cos x + be^{-3y}\cos 3x + ce^{-5y}\cos 5x + de^{-7y}\cos 7x + \cdots$.

Il est évident que cette fonction θ, désignée par $\varphi(x,y)$, satisfait à l'équation

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} = 0,$$

et à la condition

$$\varphi\left(\pm\frac{\pi}{2}, \quad y\right) = 0.$$

Il reste à remplir une troisième condition, qui est exprimée ainsi

$$\varphi(x,0) = 1$$

et il est nécessaire de remarquer que ce résultat doit avoir lieu lorsqu'on met pour x une valeur quelconque, comprise entre $-\frac{\pi}{2}$ et

Digitized by Google

$+\frac{\pi}{2}$. On ne peut en rien inférer pour les valeurs que prendrait la fonction $\varphi(x,0)$ si l'on mettait au lieu de x une quantité non comprise entre les limites $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$. L'équation (2) doit donc être assujettie à la condition suivante :

(3) $$1 = a\cos x + b\cos 3x + c\cos 5x + d\cos 7x + \ldots.$$

C'est au moyen de cette équation que l'on déterminera les coefficients a, b, c, d, ... dont le nombre est infini ».

« Le second membre est une fonction de x, qui équivaut à l'unité toutes les fois que la variable x est comprise entre $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$. On pourrait douter qu'il existât une pareille fonction, mais cette question sera pleinement éclaircie par la suite ».

On comprend aisément que Fourier a dû hésiter lorsqu'il a vu que la solution du problème qu'il s'était posé l'amenait à une égalité entre une constante et une fonction de x; grâce à son génie il a reconnu quelles étaient les valeurs à donner aux coefficients a, b, c... pour que l'égalité (3) fût respectée. Nous dirions maintenant qu'un rectangle, de hauteur 1, est décomposé en ses harmoniques, et nous savons que la relation (3) devient la série convergente :

(3 a) $$1 = \frac{4}{\pi}\left(\cos x - \frac{1}{3}\cos 3x + \frac{1}{5}\cos 5x + \cdots\right),$$

valable dans l'intervalle

de $$-\frac{\pi}{2} \quad \text{à} \quad +\frac{\pi}{2}.$$

La solution complète du problème est donnée par l'expression (2) en y substituant les valeurs correspondantes pour les coefficients a, b, c... (1). L'expression (3 a) s'écrit aussi

(3 b) $$1 = \frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^{k+1}\frac{\cos(2k-1)x}{2k-1}.$$

Une grande partie de l'ouvrage de Fourier est consacrée à la recherche des coefficients a, b, c, ..., pour le cas général d'une fonction quelconque, et à l'établissement de la règle connue qui permet d'isoler les coefficients. Il nous est impossible ici d'entrer dans les dé-

---

(1) Fourier donne l'expression finie suivante pour la relation (2)

$$\frac{\pi}{2}\,0 = \operatorname{arc\,tg}\frac{\cos x}{\sinh y}.$$

Nous renvoyons pour la démonstration de cette expression à l'ouvrage de Fourier.

Digitized by Google

tails des remarquables développements de FOURIER, mais nous devons rappeler cette règle en quelques mots, pour nous faciliter plus loin l'exposé des séries de FOURIER généralisées.

Nous avons cherché à montrer comment la solution de ce problème a été obtenue et devons ajouter que sa compréhension est fondamentale pour tout ce qui va suivre; en citant le texte même de l'ouvrage de FOURIER il nous a été possible de faire apprécier la façon élégante dont il a su exposer sa théorie, trouvant toujours en un style clair et choisi les termes appropriés et précis.

FOURIER a employé en premier lieu les limites $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$ pour faciliter ses développements. Lorsque les limites sont $-e$ et $+e$ l'expression (3 *a*) devient

$$(3\,c) \qquad 1 = \frac{4}{\pi}\left(\cos\frac{\pi}{2}\,\frac{x}{e} - \frac{1}{3}\cos 3\,\frac{\pi}{2}\,\frac{x}{e} + \cdots\right),$$

dans laquelle x ne représente plus un angle, mais une longueur. Nous nous servirons toujours de la dernière méthode de représentation, sauf dans les quelques explications strictement indispensables qui vont suivre, en renvoyant le lecteur pour la théorie générale des séries de FOURIER aux nombreux ouvrages mathématiques traitant de cette question (1).

« Il est toujours possible de développer en une série convergente de la forme

$$(4) \qquad f(x) = a_0 + a_1\cos x + a_2\cos 2x + \ldots + b_1\sin x + b_2\cos 2x + \ldots$$

une fonction $f(x)$ finie dans l'intervalle $-\pi$ à $+\pi$, les coefficients a_1, $a_2\ldots$ b_1, $b_2\ldots$ étant des constantes convenablement choisies ».

« Ce développement n'est plus valable pour les valeurs limites $-\pi$ et $+\pi$. Pour ces deux valeurs limites la série prend la même valeur

$$a_0 - a_1 + a_2 - a_3 + \ldots$$

qui est égale à la moyenne arithmétique

$$\frac{1}{2}\left[f(-\pi) + f(+\pi)\right].$$

Les coefficients se déterminent en se basant sur les faits suivants :

---

(1) Nous suivrons dans les grandes lignes les développements donnés par P. APPEL dans son ouvrage : *Eléments d'Analyse mathématique.*

Digitized by Google

1. — Si m et n sont deux entiers positifs *différents*, on a

$$(5) \qquad \int_{-\pi}^{+\pi} \cos mx \cos nx dx = \int_{-\pi}^{+\pi} \sin mx \sin nx dx = 0.$$

2. — Lorsque $m = n$, il y a lieu de considérer les deux intégrales

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 nx dx \qquad \text{et} \qquad \int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 nx dx.$$

Deux cas sont à distinguer suivant que n est différent ou égal à zéro.

A. $n \neq 0$. Dans ce cas les deux intégrales sont égales à π.

En effet on a

$$\cos^2 nx = \frac{1 + \cos 2nx}{2} \qquad \text{et} \qquad \sin^2 nx = \frac{1 - \cos 2nx}{2}.$$

Les deux intégrales deviennent donc

$$(6) \qquad \begin{cases} \displaystyle\int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 nx dx = \left(\frac{x}{2} + \frac{\sin 2nx}{4n} \right)_{-\pi}^{+\pi} = \pi, \\ \displaystyle\int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 nx dx = \left(\frac{x}{2} - \frac{\sin 2nx}{4n} \right)_{-\pi}^{+\pi} = \pi. \end{cases}$$

B. Si $n = 0$, on a

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 nx dx = 2\pi; \qquad \int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 nx dx = 0.$$

(3) On a toujours

$$(7) \qquad \int_{-\pi}^{+\pi} \sin nx \cos nx dx = 0.$$

Reprenons le développement supposé

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos x + a_2 \cos 2x + \ldots + a_n \cos nx + \ldots + b_1 \sin x + b_2 \sin 2x + \ldots + b_n \sin nx + \ldots$$

Pour déterminer a_n $(n \neq 0)$ on multiplie les deux membres par $\cos nx dx$ et on intègre entre $-\pi$ et $+\pi$. On obtient dans le premier membre

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx dx.$$

Dans le deuxième membre on a une somme d'intégrales qui sont toutes nulles, excepté celle qui multiplie a_n

On a donc

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx dx = a_n \int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 nx dx.$$

Le coefficient de a_n étant π il vient :

$$(8\,a) \qquad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx dx.$$

Digitized by Google

De même, pour avoir b_n, on multiplie par $\sin nxdx$ et on intègre entre les mêmes limites $-\pi$ et $+\pi$.

Toutes les intégrales du deuxième membre sont nulles, sauf celle qui contient b_n, et l'on a

$$(8\,b) \qquad b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{+\pi} f(x)\sin nxdx.$$

Il reste à calculer a_0. Pour cela on multiplie par dx les deux membres du développement et on intègre de $-\pi$ à $+\pi$. Toutes les intégrales du second membre sont nulles, sauf celle qui contient a_0 et on a

$$(8\,c) \qquad a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{+\pi} f(x)dx \text{ ».}$$

Dans le prochain paragraphe nous aurons l'occasion de revenir sur cette question, lorsque nous étudierons les séries de Fourier généralisées, beaucoup moins connues que les précédentes.

12. — *Propagation de la chaleur dans un prisme rectangulaire. (Deuxième problème de Fourier amenant aux séries généralisées).*

Dans ce problème, Fourier étudie la loi de la répartition de la température dans un prisme carré infini, assujetti à sa base à une température constante qu'il pose égale à l'unité. Ce prisme rayonne vers une enceinte dont la température est admise égale à zéro.

Nous soulignons la différence essentielle qui existe entre ce problème et le précédent; dans celui-ci les faces du mur étaient à la température zéro de l'enceinte, tandis que dans le problème présent les faces du prisme présentent une différence de température par rapport à celle de l'enceinte.

On voit qu'il s'agit en réalité d'un problème à trois dimensions, mais dans la section de la base ce problème se réduit à deux dimensions.

Fourier a admis le cas d'un prisme carré, dont les quatre faces ont le même coefficient d'émission de chaleur h; mais il est possible, sans compliquer les explications, d'examiner tout de suite le cas d'un prisme rectangulaire. Donnons aux côtés de sa base les longueurs $2a$ et $2b$ et admettons que les faces d'abscisses $\pm a$ aient le coefficient d'émission de chaleur h_a, et les faces d'abscisses $\pm b$ le coefficient h_b (fig. 17).

Nous savons que la température dans un point donné du prisme

Digitized by Google

doit répondre à l'équation de LAPLACE

$$\frac{\partial^2 0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 0}{\partial z^2} = 0.$$

Nous savons d'autre part que la fonction 0 doit être paire en x et en y, vu les conditions symétriques de refroidissement, et qu'elle doit devenir infiniment petite lorsque z devient infiniment grand; Fou-

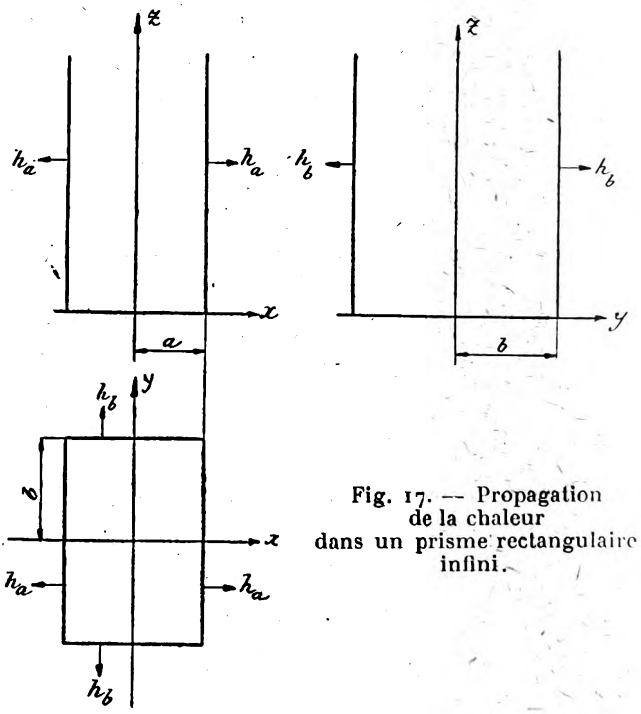


Fig. 17. — Propagation de la chaleur dans un prisme rectangulaire infini.

RIER ajoute que d'après cela il est facile de voir que l'on peut choisir pour valeur particulière de 0 la fonction

$$A e^{-pz} \cos mx \cos ny, \tag{1}$$

ce qui se conçoit aisément en tenant compte des considérations du paragraphe précédent.

On voit que pour satisfaire à l'équation de LAPLACE, la condition suivante doit être remplie :

$$p^2 - m^2 - n^2 = 0$$

ou

$$p = \sqrt{m^2 + n^2}. \tag{2}$$

Pour déterminer les facteurs m et n nous devons avoir recours aux conditions à la surface (V. les relations (4) et (5) du paragraphe 3).

Digitized by Google

$$(3)\qquad \begin{cases} \mp K\left(\dfrac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=\pm a} = h_a\theta_{x=\pm a}, \\ \mp K\left(\dfrac{\partial\theta}{\partial y}\right)_{y=\pm b} = h_b\theta_{y=\pm b}, \end{cases}$$

en désignant par K la conductibilité thermique de la matière du prisme.

Ces relations donnent en combinaison avec (1)

$$Kme^{-pz}\sin ma\cos ny = h_a e^{-pz}\cos ma\cos ny,$$

ou

$$Km\sin ma - h_a\cos ma = 0,$$

ou encore

$$(4a)\qquad ma\ \mathrm{tg}\ ma = \frac{h_a}{K}a = \nu_a a.$$

On obtient de même de la deuxième équation (3)

$$(4b)\qquad nb\ \mathrm{tg}\ nb = \frac{h_b}{K}b = \nu_b b.$$

Les équations (4) se retrouvent encore dans d'autres domaines de la

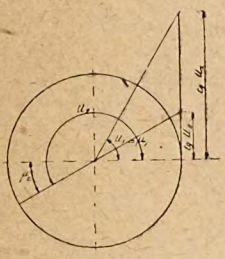


Fig. 18. — Les deux premières racines de l'équation $u\ \mathrm{tg}\ u = C$.

physique mathématique; ce sont des équations transcendantes permettant de déterminer les valeurs de m et de n. Nous verrons que ces équations ont une infinité de racines, dont chacune donne pour (1) une solution de l'équation de Laplace. La solution de ces équations transcendantes s'obtient par approximations successives; nous donnerons plus loin un moyen rapide et facile pour les résoudre.

Les relations (4) demandent la recherche d'un arc $u = ma$ ou nb, qui, multiplié par sa tangente, donne un produit fixé. Soit u_1 (fig. 18) un angle dans le premier quadrant qui satisfait à cette condition; on voit aisément qu'il existe un deuxième angle u_2, dans le troisième quadrant, répondant à la même condition, un troisième angle u_3, dans le cinquième quadrant et ainsi de suite, les angles se rapprochant

Digitized by Google

de plus en plus de multiples entiers de π. Il n'y a pas de solutions dans les quadrants pairs, où les tangentes ont des valeurs négatives.

Admettons pour l'instant que nous ayons trouvé les racines des équations (4) et rangeons-les par ordre, en les munissant de leurs indices,

$$m_1,\ m_2 \ldots\ m_i \ldots$$

et

$$n_1,\quad n_2,\quad \ldots\quad n_k,\quad \ldots$$

Des racines m_i et n_k quelconques, introduites en (1), donnent une solution de l'équation de Laplace, tenant compte des conditions à la surface.

La relation (1) devient alors

$$A_{i,k} e^{-p_{i,k} z} \cos m_i x \cos n_k y,$$

et l'intégrale générale de l'équation de Laplace est donnée par la série convergente double :

$$\begin{aligned}(5\ a)\quad \theta = {} & A_{1,1} e^{-p_{1,1} z} \cos m_1 x \cos n_1 y + A_{1,2} e^{-p_{1,2} z} \cos m_1 x \cos n_2 y + \cdots \\ & + A_{1,k} e^{-p_{1,k} z} \cos m_1 x \cos n_k y + \cdots \\ & + A_{2,1} e^{-p_{2,1} z} \cos m_2 x \cos n_1 y + A_{2,2} e^{-p_{2,2} z} \cos m_2 x \cos n_2 y + \cdots \\ & + A_{2,k} e^{-p_{2,k} z} \cos m_2 x \cos n_k y + \cdots \\ & + A_{i,1} e^{-p_{i,1} z} \cos m_i x \cos n_1 y + A_{i,2} e^{-p_{i,2} z} \cos m_i x \cos n_2 y + \cdots \\ & + A_{i,k} e^{-p_{i,k} z} \cos m_i x \cos n_k y + \cdots,\end{aligned}$$

que nous écrivons symboliquement :

$$(5\ b)\qquad \theta = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{i,k} \cos m_i x \cos n_k y e^{-p_{i,k} z}.$$

La condition que la température est égale à l'unité en chaque point de la base nous permet de déterminer les coefficients A, et c'est à cette occasion que le génie de Fourier s'est encore particulièrement manifesté.

Pour la base nous avons $z = 0$ ce qui donne

$$\begin{aligned}(6)\qquad 1 = {} & A_{1,1} \cos m_1 x \cos n_1 y + A_{1,2} \cos m_1 x \cos n_2 y + \cdots \\ & + A_{1,k} \cos m_1 x \cos n_k y + \cdots \\ & + A_{i,1} \cos m_i x \cos n_1 y + A_{i,2} \cos m_i x \cos n_2 y + \cdots \\ & + A_{i,k} \cos m_i x \cos n_k y + \cdots.\end{aligned}$$

Nous pouvons écrire (4 a) de la façon suivante :

$$m_1 \operatorname{tg} m_1 a = m_2 \operatorname{tg} m_2 a = \cdots = m_i \operatorname{tg} m_i a = m_j \operatorname{tg} m_j a,$$

m_i et m_j étant des racines quelconques de (4 a). On a donc

$$(7\ a)\qquad m_i \sin m_i a \cos m_j a - m_j \sin m_j a \cos m_i a = 0,$$

et de même

$$(7\ b)\qquad n_k \sin n_k b \cos n_j b - n_j \sin n_j b \cos n_k b = 0.$$

Digitized by Google

Multiplions (6) par $\cos m_i x dx$ et par $\cos n_k y dy$ et intégrons pour x entre $-a$ et $+a$ et pour y entre $-b$ et $+b$.

Nous obtenons, en désignant par l'indice j les termes d'un ordre quelconque

$$(8)\quad \int_{-a}^{+a} \cos m_i x dx \int_{-b}^{+b} \cos n_k y dy$$
$$= A_{1,1} \int_{-a}^{+a} \cos m_1 x \cos m_i x dx \int_{-b}^{+b} \cos n_1 y \cos n_k y dy + \cdots$$
$$+ A_{j,1} \int_{-a}^{+a} \cos m_j x \cos m_i x dx \int_{-b}^{+b} \cos n_1 y \cos n_k y dy + \cdots$$
$$+ A_{j,j} \int_{-a}^{+a} \cos m_j x \cos m_i x dx \int_{-b}^{+b} \cos n_j y \cos n_k y dy + \cdots$$
$$+ A_{i,k} \int_{-a}^{+a} \cos^2 m_i x dx \int_{-b}^{+b} \cos^2 n_k y dy + \cdots.$$

Or, on a, pour le terme général, à coefficient $A_{j,j}$

$$(9)\quad \int_{-a}^{+a} \cos m_j x \cos m_i x dx = 2 \frac{m_i \sin m_i a \cos m_j a - m_j \sin m_j a \cos m_i a}{m_i^2 - m_j^2},$$

ce qui d'après la relation (7 a), découlant de (4 a), est égal à zéro. Il en est de même pour l'intégrale

$$\int_{-b}^{+b} \cos n_j y \cos n_k y dy$$

L'intégrale

$$\int_{-a}^{+a} \cos^2 m_i x dx$$

devient par contre :

$$(10\,a)\quad \int_{-a}^{+a} \cos^2 m_i x dx = \left[\frac{x}{2} + \frac{\sin 2 m_i x}{4 m_i}\right]_{-a}^{+a} = \frac{2 m_i a + \sin 2 m_i a}{2 m_i},$$

et de même

$$(10\,b)\quad \int_{-b}^{+b} \cos^2 n_k y dy = \frac{2 n_k b + \sin 2 n_k b}{2 n_k}.$$

Il ne subsiste donc dans le deuxième membre que le terme à coefficient $A_{i,k}$. Le procédé pour isoler les coefficients dans cette série double est donc analogue à celui employé dans les séries de Fourier ordinaires.

On a de plus

$$(11\,a)\quad \int_{-a}^{+a} \cos m_i x dx = \left[\frac{\sin m_i x}{m_i}\right]_{-a}^{+a} = \frac{2 \sin m_i a}{m_i},$$

et

$$(11\,b)\quad \int_{-b}^{+b} \cos n_k y dy = \frac{2 \sin n_k b}{n_k}.$$

Digitized by Google

On obtient donc finalement pour le coefficient $A_{i,k}$ la valeur

$$A_{i,k} = \frac{4 \sin m_i a}{2m_i a + \sin 2m_i a} \times \frac{4 \sin n_k b}{2n_k b + \sin 2n_k b}. \tag{12}$$

Nous écrivons symboliquement

$$\frac{4 \sin m_i a}{2m_i a + \sin 2\, m_i a} = S_{m_i a}, \tag{13}$$

et

$$\frac{4 \sin n_k b}{2n_k b + \sin 2n_k b} = S_{n_k b}.$$

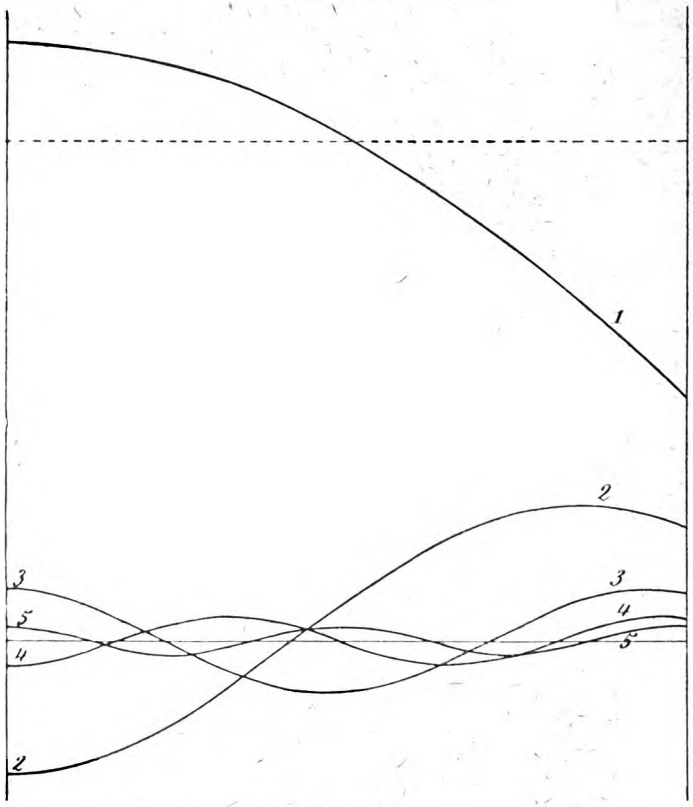


Fig. 19. — Les cinq premiers harmoniques de la fonction $f(x) =$ constante dans l'intervalle de o à $+a$ de la variable x.

Les fonctions S ont une très grande importance dans tous les problèmes de la théorie de la chaleur. Leurs valeurs ont été portées dans la table figurant à la fin de cette étude, pour toutes les valeurs des racines qui pourront se rencontrer dans les applications (1).

(1) Cette table a été dressée par mon frère, M Georges Roth, ingénieur à Paris auquel je rends ici hommage pour la patience et pour le soin, avec lesquels il a calculé ces nombres.

Digitized by Google

L'expression (6) donne le développement en une série double d'une constante de valeur 1, valable dans l'intervalle de $-a$ à $+a$.

On voit aisément que l'on a également

$$(14)\quad 1 = \frac{4\sin m_1 a}{2m_1 a + \sin 2m_1 a}\cos m_1 x + \frac{4\sin m_2 a}{2m_2 a + \sin 2m_2 a}\cos m_2 x + \cdots + \frac{4\sin m_i a}{2m_i a + \sin 2m_i a}\cos m_i x + \cdots = \sum_{i=1}^{i=\infty} S_{m_i a}\cos m_i x,$$

car il aurait suffit de faire pour la seule variable x le développement que nous venons de faire pour la série double.

Dans la figure 19, on a représenté les cinq premiers harmoniques, tirés de (14), de la fonction $f(x) =$ constante.

On conçoit facilement qu'il est possible de développer une fonction $f(x)$ quelconque en une série de FOURIER généralisée, dans laquelle les facteurs de x répondent à l'équation (4), pour une valeur quelconque de $m_i a$ comprise entre 0 et ∞.

Nous allons maintenant examiner les séries auxquelles correspondent ces valeurs extrêmes 0 et ∞. Nous avons de (4) d'abord

$$(15\,a)\qquad m_i a \operatorname{tg} m_i a = 0$$

et ensuite

$$(15\,b)\qquad m_k a \operatorname{tg} m_k a = \infty$$

La relation (15 a) donne

$$(16\,a)\quad \operatorname{tg} m_i a = 0 \quad \text{et} \quad m_i a = 0,\ \frac{2\pi}{2},\ 4\frac{\pi}{2},\ \ldots\ 2(i-1)\frac{\pi}{2},\ \ldots$$

i prenant les valeurs de tous les nombres entiers de 1 à ∞.

Les solutions de l'équation (15 a) sont données par les multiples pairs de $\frac{\pi}{2}$.

On tire d'autre part de (15 b)

$$(16\,b)\quad \operatorname{tg} m_k a = \infty \quad \text{et} \quad m_k a = \frac{\pi}{2},\ 3\frac{\pi}{2},\ \ldots\ (2k-1)\frac{\pi}{2},\ \ldots.$$

Les racines m_k sont les multiples impairs de $\frac{\pi}{2}$, k prenant les valeurs de tous les nombres entiers de 1 à ∞.

On en conclut que la série

$$(17\,a)\qquad \sum_{i=1}^{i=\infty}\cos m_i x = \sum_{i=1}^{\infty}\cos 2(i-1)\frac{\pi}{2}\frac{x}{a},$$

est un développement en cosinus multiples pairs de l'angle $\frac{\pi}{2}\frac{x}{a}$ et que la série

$$(17\,b)\qquad \sum_{k=1}^{k=\infty}\cos m_k x = \sum_{k=1}^{\infty}\cos (2k-1)\frac{\pi}{2}\frac{x}{a},$$

Digitized by Google

est un développement en cosinus multiples impairs du même angle, les deux séries étant valables dans l'intervalle de $-\frac{\pi}{2}$ à $+3\frac{\pi}{2}$.

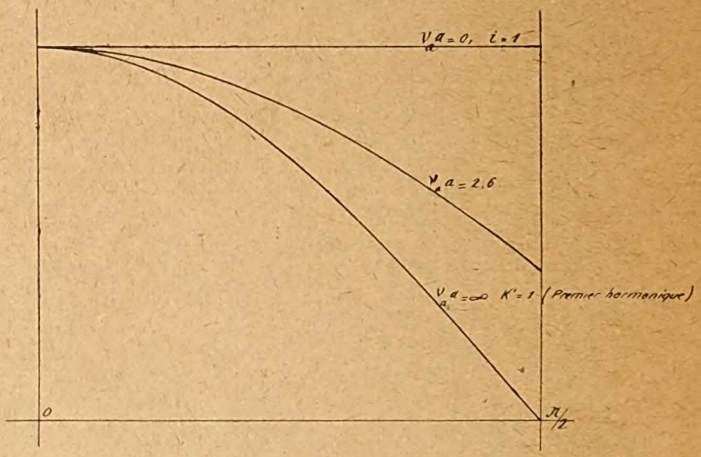


Fig. 20 *a*. — La déformation du premier terme de la série $\sum_{j=1}^{\infty} \cos m_j x$, lorsque $m_j a \operatorname{tg} m_j a = \nu_a a$ varie de 0 à ∞.

Ces séries, correspondant respectivement à $\nu_a a = 0$ et $\nu_a a = \infty$, sont des séries de Fourier ordinaires, qui découlent ainsi comme cas

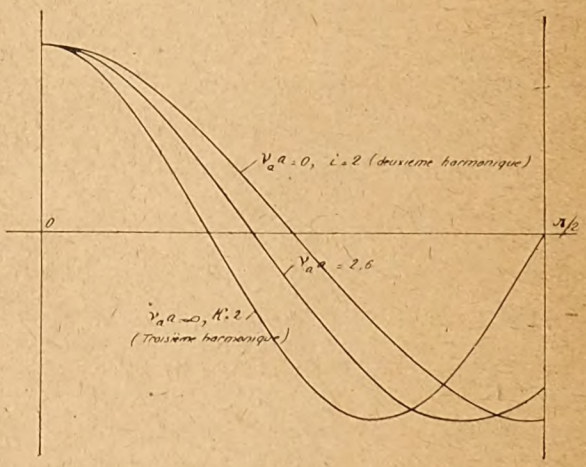


Fig. 20 *b*. — La déformation du deuxième terme de la série $\sum_{j=1}^{\infty} \cos m_j x$, lorsque $m_j a \operatorname{tg} m_j a = \nu_a a$ varie de 0 à ∞.

limites des séries de Fourier généralisées. Remarquons que le terme de la première série qui correspond à $i = 1$ représente une valeur constante.

Digitized by Google

Dans les figures 20_a, 20_b et 20_c, nous avons représenté les premiers, deuxièmes et troisièmes termes de la série (17 *a*) qui répond à $\nu_a a = 0$, et de la série (17 *b*) qui répond à $\nu_a a = \infty$, et avons ajouté les premier, deuxième et troisième termes d'une série généralisée correspondant à la valeur intermédiaire de $\nu_a a = 2{,}6$.

On voit par exemple, que la courbe de la fig. 20_b ayant pour constantes $\nu_a a = \infty$, $k = 2$, a trois périodes entières dans l'intervalle de $-\frac{\pi}{2}$ à $+\frac{3\pi}{2}$; nous savons que l'on dit qu'elle représente un troisième harmonique, et il est intéressant de constater sur ces courbes comment on parvient des harmoniques entiers, d'ordre pair, à des

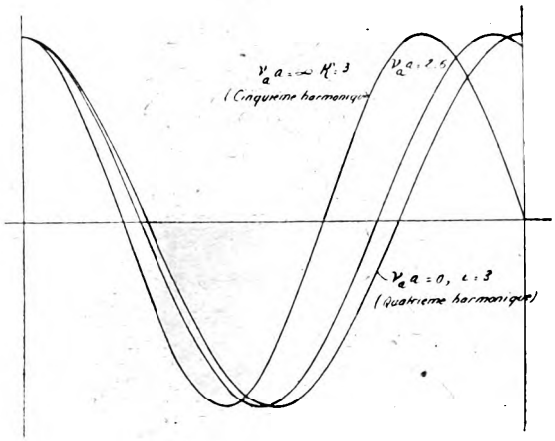


Fig. 20 *c*. — La déformation du troisième terme de la série $\sum_{i=1}^{\infty} \cos m_j x$, lorsque $m_j a \operatorname{tg} m_j a = \nu_a a$ varie de 0 à ∞.

harmoniques entiers, d'ordre impair, par l'intermédiaire d'autres harmoniques non entiers qui découlent des séries généralisées.

Nous avons dit plus haut que les séries (17) sont valables dans l'intervalle de $-\frac{\pi}{2}$ à $+3\frac{\pi}{2}$, mais en réalité nous aurions dû limiter cet intervalle à $-\frac{\pi}{2}$ et $+\frac{\pi}{2}$ qui nous intéresse seul ici. Il peut en effet arriver que nous soyons obligés de représenter la même fonction en des développements de cosinus multiples pairs et impairs de l'angle. Prenons par exemple la fonction représentée sur la fig. 21 par la ligne *abc* dans l'intervalle de $-\frac{\pi}{2}$ à $+\frac{\pi}{2}$. Nous pouvons admettre qu'elle continue dans l'intervalle de $+\frac{\pi}{2}$ à $+3\frac{\pi}{2}$

Digitized by Google

selon la ligne $c'd'e'$, auquel cas elle peut être donnée par un développement en cosinus multiples pairs de l'angle, ou qu'elle continue selon la ligne $c''d''e''$, auquel cas le développement est en multiples impairs.

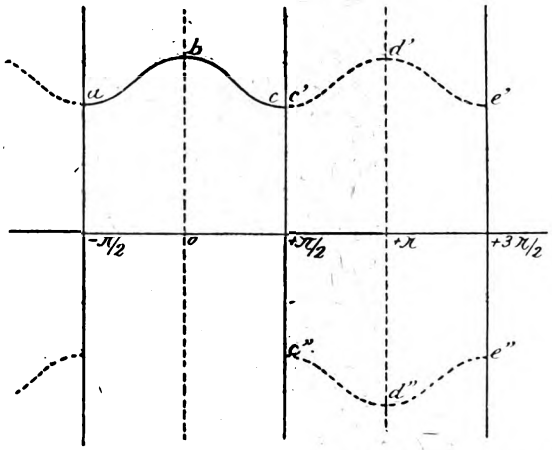


Fig. 21. — *abc c'd'e'* fonction décomposable en harmoniques pairs, *abc c''d''e''* fonction décomposable en harmoniques impairs

Il est inutile de pousser ces investigations plus loin et nous terminons ce paragraphe en expliquant une méthode pour résoudre l'équation transcendante (4).

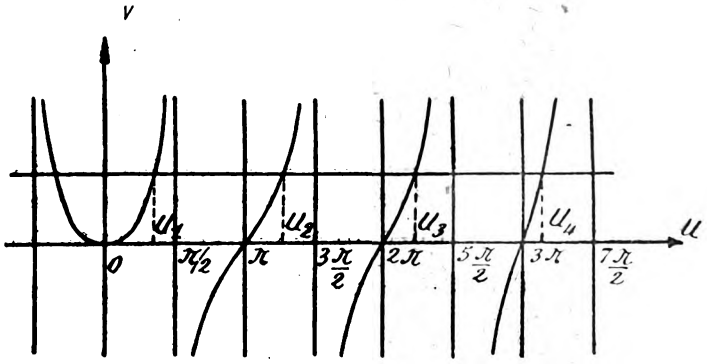


Fig. 22. — La résolution graphique de l'équation $v = u \operatorname{tg} u$ d'après FOURIER.

FOURIER s'était déjà inquiété de trouver une solution rapide de ces équations et il a indiqué le moyen suivant, que nous extrayons textuellement de son ouvrage, en modifiant seulement les notations et en reproduisant la fig. 22, tirée de son texte :

« Il est facile de connaître la nature de l'équation

Digitized by Google

$$u \operatorname{tg} u = \frac{ha}{K} = va;$$

il suffit de supposer (fig. 22) que l'on ait construit la courbe

$$v = u \operatorname{tg} u$$

l'arc u étant pris pour abscisse et v pour ordonnée. Cette courbe est composée de branches asymptotiques. Les abscisses qui correspondent aux asymptotes sont $\frac{\pi}{2}$, $3\frac{\pi}{2}$, $5\frac{\pi}{2}$ .., celles qui correspondent aux points d'intersection sont π, 2π, 3π... Si maintenant on élève à l'origine une ordonnée égale à la quantité connue $\frac{ha}{K}$, et que, par son extrémité on mène une parallèle à l'axe des abscisses, les points d'intersection donneront les racines de l'équation proposée ».

On peut, en effet, en traçant les courbes v très exactement, arriver très près des solutions recherchées, que l'on contrôlera ensuite, mais la disposition de FOURIER a l'inconvénient de nécessiter pour le tracé une grande surface. On arrive du reste avec un peu d'habitude à trouver assez rapidement les solutions par des approximations successives.

La méthode proposée nécessite l'emploi de la fig. 23 et est la suivante (1); nous pensons que les explications sont grandement facilitées en prenant un exemple concret. Cherchons les premières racines de l'équation transcendante

(18) $$u \operatorname{tg} u = 2$$

Sur la figure 23, nous remarquons d'abord une famille de courbes coupées par des droites et nous distinguons trois systèmes de droites d'inclinaisons différentes. Nous désignons par I le système des droites les moins inclinées, par II le système d'inclinaison moyenne et par III le système des droites les plus inclinées. Nous ne nous occuperons ici que des droites en traits pleins, les lignes pointillées devant servir plus tard pour la solution des problèmes dissymétriques. Nous voyons d'autre part que chacune des courbes porte trois nombres différents, correspondant à des droites horizontales marquées également I, II et III. Pour trouver les premières racines de l'équation (18), nous prenons d'abord la courbe marquée 2 sur l'horizontale I et nous fixons ses points d'intersection, dont le deuxième a été marqué à titre d'exemple, avec les droites parallèles, à traits

(1) Cette méthode a été élaborée par mon collaborateur, M. G. KOUSKOFF : comme nous le verrons plus loin les courbes de la figure 23 permettent aussi la solution des problèmes où les conditions de refroidissement ne sont pas symétriques.

Digitized by Google

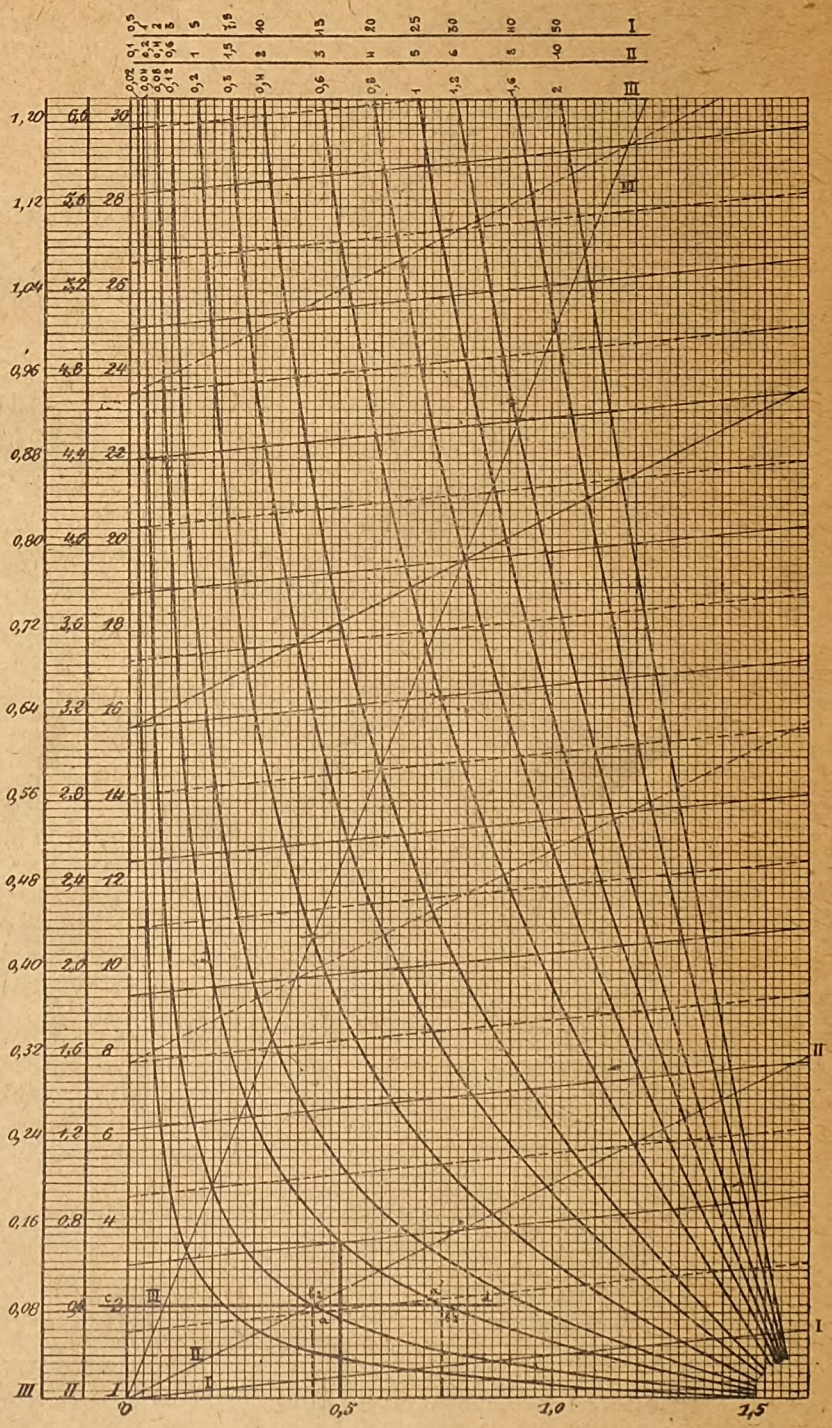


Fig. 23. — Familles des courbes donnant la résolution de l'équation $u \operatorname{tg} u = C$ ou du système à deux équations $\begin{cases} u \operatorname{tg} (u+\varphi) = A, \\ u \operatorname{tg} (u-\varphi) = B. \end{cases}$

Digitized by Google

pleins, du système I; nous trouvons directement sur l'échelle verticale I les racines

$$\begin{aligned} u_1 &= 1{,}08 & u_6 &= 15{,}83 \\ u_2 &= 3{,}60 & u_7 &= 18{,}95 \\ u_3 &= 6{,}55 & u_8 &= 22{,}10 \\ u_4 &= 9{,}65 & u_9 &= 25{,}20 \\ u_5 &= 12{,}70 & u_{10} &= 28{,}35 \end{aligned}$$

la deuxième décimale étant incertaine.

Il est nécessaire d'exprimer les solutions u_1, u_2... u_i par leur excédent μ_i, ou comme s'exprime LAMÉ, par leur augment, sur des multiples de π; on a

$$u_1 = \mu_1, \quad u_2 = \pi + \mu_2, \quad u_3 = 2\pi + \mu_3, \quad \ldots u_i = (i - 1)\pi + \mu_i,$$

Les valeurs de μ_i se trouvent directement, avec une assez grande précision, sur l'échelle horizontale, comme abscisse des points d'intersection; on trouve

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 1{,}075 & \mu_6 &= 0{,}125 \\ \mu_2 &= 0{,}505 & \mu_7 &= 0{,}105 \\ \mu_3 &= 0{,}295 & \mu_8 &= 0{,}090 \\ \mu_4 &= 0{,}205 & \mu_9 &= 0{,}080 \\ \mu_5 &= 0{,}155 & \mu_{10} &= 0{,}070 \end{aligned}$$

la troisième décimale étant incertaine.

Au lieu du système I nous aurions aussi pu trouver les deux premières racines de l'équation (18) par le système II, ou la première seulement par le système III, avec une bien plus grande précision que par l'emploi du système I. Il faut toujours faire usage des systèmes II ou III lorsque cela est possible, car il importe que les premières racines surtout soient calculées avec la plus grande précision possible. Nous trouvons pour les deux premières racines de l'équation (18) plus exactement par le système II

$$u_1 = 1{,}075, \quad u_2 = 3{,}65$$

et par le système III, qui donne exactement la troisième décimale

$$u_1 = 1{,}077.$$

Le système I s'applique à des valeurs de u tg u comprises entre 0,5 et 50. Pour des valeurs plus faibles de u tg u on se sert des systèmes II et III; on n'obtient que très peu de racines, mais pour des raisons de convergence il est inutile d'en connaître plus que n'en donnent les courbes.

Lorsque aucun des nombres portés sur les courbes de la figure 23

Digitized by Google

ne correspond exactement à la valeur de $u \operatorname{tg} u$ de (18), on procède par interpolation graphique. C'est ainsi que dans l'exemple du paragraphe (14), il s'agit de trouver les racines de l'équation

$$u \operatorname{tg} u = 2{,}59.$$

Les courbes de la figure 23, jouissent de la propriété que les distances verticales entre deux courbes sont proportionnelles à la différence des valeurs $u \operatorname{tg} u$ indiquées sur ces courbes. Une verticale quelconque est divisée par les courbes 1, 2, 3 et 5 dans le rapport 1 : 1 : 2. On peut donc tracer la courbe de valeur 2,59 en divisant la distance verticale entre les courbes 2 et 3 dans le rapport 0,59 à 0,41; il suffit de connaître cette courbe dans le voisinage des droites parallèles à traits pleins, pour obtenir les solutions.

Nous pouvons maintenant indiquer l'emploi des tables permettant de déterminer les fonctions S, et reprenons dans ce but l'exemple donné plus haut.

Pour l'usage de la table, nous avons seulement besoin des excédents μ dont nous avons donné les valeurs plus haut. Nous devons faire correspondre à la valeur de μ_1 celle de S_{u1}, prise dans la première colonne, à la valeur de μ_2 celle de S_{u2}, prise dans la deuxième colonne et ainsi de suite, en tenant bien entendu compte du signe marqué en tête de chaque colonne; nous obtenons par interpolation proportionnelle,

Pour	$\mu_1 = 1{,}075,$	$S_{u1} = + 1{,}17793.$
Pour	$\mu_2 = 0{,}505,$	$S_{u2} = - 0{,}23773.$
Pour	$\mu_3 = 0{,}295,$	$S_{u3} = + 0{,}08560.$
Pour	$\mu_4 = 0{,}205,$	$S_{u4} = - 0{,}04142.$
Pour	$\mu_5 = 0{,}155,$	$S_{u5} = + 0{,}02398.$
Pour	$\mu_6 = 0{,}125,$	$S_{u6} = - 0{,}01562.$

La somme des six valeurs de S_u est de 0,99274; ceci donne un contrôle du calcul car d'après la formule (14), on doit avoir pour $x = 0$

$$\sum_{i=1}^{\infty} S_{ui} = 1.$$

L'erreur est d'environ 7 0/00.

Lorsque les valeurs de la constante $u \operatorname{tg} u$ sont très faibles, la convergence des valeurs de S_{ui} est très rapide, et il suffit très souvent de ne considérer que le premier terme. Dans l'exemple du paragraphe (14), où il faut résoudre l'équation $u \operatorname{tg} u = 0{,}0375$, on trouve $S_{u1} = + 1{,}0062$ et $S_{u2} = - 0{,}0075$, cette dernière valeur étant déjà négligeable par rapport à S_{u1}.

Digitized by Google

13. — *La répartition de la température dans les sections droites d'une colonne de transformateur ou d'une bobine inductrice. — Cas symétrique.*

Nous allons traiter maintenant une question qui est d'un grand intérêt pratique, la répartition de la température dans la section droite d'un transformateur ou dans celle d'une bobine inductrice.

Dans les deux problèmes traités par FOURIER, la chaleur était communiquée au corps considéré par une source extérieure, aucune chaleur n'étant produite dans le corps même. Dans ces conditions la fonction donnant la température θ en chaque endroit du corps devait répondre à l'équation de LAPLACE. Il n'en est plus de même dans les problèmes que nous allons traiter maintenant; la chaleur étant produite dans le corps considéré, la fonction θ doit satisfaire à l'équation de POISSON.

Nous admettons que la section de colonne de transformateur considérée, et la partie avoisinant cette section, sont assez loin des extrémités de la colonne pour que l'on puisse négliger l'influence de ces extrémités; dans cette hypothèse les conditions d'échauffement sont identiques d'une section à l'autre de cette partie et la température devient indépendante de la dimension axiale de la colonne; le problème se trouve donc réduit à un problème à deux dimensions. Nous admettons de même que la température ne varie pas d'une section droite d'une bobine inductrice à une autre, ce qui ramène ce problème également à un problème à deux dimensions.

Pour ne pas trop compliquer notre exposé nous examinerons d'abord le cas où les conditions de refroidissement sont symétriques et introduisons les notations de la fig. 17 du problème précédent; nous posons aussi égale à zéro la valeur de la température ambiante θ_a. Nous tenons toutefois compte de ce que les conductibilités thermiques, lorsqu'il s'agit d'une colonne de transformateur, et très souvent également dans le cas de bobines inductrices, sont différentes dans les sens x et y, et nous désignons par K_x la première et par K_y la deuxième. En désignant toujours par w la quantité de chaleur produite par unité de volume l'équation de POISSON est

$$K_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + w = 0, \tag{1}$$

à laquelle doit répondre la fonction θ dans chaque point de la section. Nous écrivons (1) sous la forme :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{K_y}{K_x} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{w}{K_x} = 0,$$

Digitized by Google

et en désignant par σ^2 et β les rapports

$$\sigma^2 = \frac{K_y}{K_x}, \tag{2}$$

et

$$\beta = \frac{w}{K_x}, \tag{3}$$

nous obtenons

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \sigma^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \beta = 0. \tag{1 b}$$

Il y a deux façons d'intégrer cette équation, et nous allons exposer les deux.

Plusieurs auteurs (1), qui ont traité ce problème ont remplacé la fonction θ par une fonction U répondant à l'équation de LAPLACE, telle que

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \sigma^2 \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0. \tag{4}$$

L'expression la plus simple, permettant cette transformation est

$$\theta = U - \frac{\beta}{2}\left(x^2 + \frac{y^2}{\sigma^2}\right).$$

On se rend compte aisément, en différentiant deux fois d'après x et y et en faisant la somme, que l'on a en effet dans ces conditions

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \sigma^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \beta = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \sigma^2 \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0.$$

Cherchons une solution particulière pour U de la forme proposée par FOURIER :

$$A \cos mx \cos \frac{p}{\sigma} y \; ; \tag{5}$$

m et p ne sont pas indépendants l'un de l'autre, car pour que (5) satisfasse à la condition de LAPLACE, il faut que

$$m = p\sqrt{-1}, \quad \text{ou} \quad p = m\sqrt{-1}. \tag{6}$$

Prenons la deuxième de ces expressions; on a

$$\cos \frac{p}{\sigma} y = \cos \frac{m}{\sigma} \sqrt{-1}\, y = \cosh \frac{m}{\sigma} y$$

ce qui donnerait comme intégrale de (4)

$$A \cos mx \cosh \frac{m}{\sigma} y \; ;$$

on aura évidemment une deuxième intégrale formée symétriquement

$$B \cosh nx \cos \frac{n}{\sigma} y.$$

(1) K. HUMBURG et M. JACOB. V. Bibliographie.

Digitized by Google

L'intégrale particulière de (4) sera donc

$$\text{(7)} \qquad A \cos mx \cosh \frac{m}{\sigma} y + B \cosh nx \cos \frac{n}{\sigma} y,$$

où m et n sont entièrement indépendants l'un de l'autre.

L'intégrale générale sera une somme de termes analogues à ceux de (7), les constantes A, B, m et n étant données par les conditions aux limites.

Mais il n'est pas nécessaire de faire cette transformation et nous n'adopterons pas cette solution; elle a l'inconvénient d'être formée par la somme de deux séries et amène à des expressions extrêmement compliquées pour les constantes A, B, m et n. De plus elle fait entièrement défaut, lorsque les conditions ne sont plus aussi simples que celles du présent problème.

Nous proposons la solution suivante, beaucoup plus simple et très fertile dans les applications les plus compliquées ; nous disons que la solution particulière, non plus de l'équation de Laplace (4), mais directement de l'équation de Poisson (1 b), peut aussi être donnée par l'expression

$$\text{(8)} \qquad A \cos mx \cos \frac{n}{\sigma} y,$$

et écrivons l'intégrale générale sous la forme

$$\text{(9)} \qquad \theta = \sum_{i=1}^{i=\infty} \sum_{k=1}^{k=\infty} A_{i,k} \cos m_i x \cos \frac{n_k}{\sigma} y.$$

exprimée maintenant par une seule série double.

En dérivant (8) une première fois d'après x et y nous obtenons

$$\text{(10 } a\text{)} \qquad -mA \sin mx \cos \frac{n}{\sigma} y \quad \text{et} \quad -\frac{n}{\sigma} A \cos mx \sin \frac{n}{\sigma} y,$$

et en dérivant une deuxième fois

$$\text{(10 } b\text{)} \qquad -m^2 A \cos mx \cos \frac{n}{\sigma} y \quad \text{et} \quad -\frac{n^2}{\sigma^2} A \cos mx \cos \frac{n}{\sigma} y.$$

En introduisant ces valeurs dans la série (9) on voit que celle-ci satisfait à l'équation de Poisson (1 b) si

$$\text{(11)} \qquad \beta = \sum_{i=1}^{i=\infty} \sum_{k=1}^{k=\infty} (m_i^2 + n_k^2) A_{i,k} \cos m_i x \cos \frac{n_k}{\sigma} y.$$

Dans cette expression m et n sont indépendants.

Nous avons ainsi une première relation pour les trois constantes A, m et n, les deux autres étant fournies par les conditions de refroidissement à la surface, données par les relations (3) du paragraphe (12)

$$\text{(12)} \qquad \mp K_x \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=\pm a} = h_a \theta_{x=\pm a},$$

Digitized by Google

et

$$\mp K_y \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)_{y=\pm b} = h_b \theta_{y=\pm b},$$

qui deviennent pour les deux faces $+a$ et $-a$, ainsi que pour $+b$ et $-b$

$$m_i K_x A_{i,k} \sin m_i a \cos \frac{n_k}{\sigma} y = h_a A_{i,k} \cos m_i a \cos \frac{n_k}{\sigma} y,$$

et

$$\frac{n_k}{\sigma} K_y A_{i,k} \cos m_i x \sin \frac{n_k}{\sigma} b = h_b A_{i,k} \cos m_i x \cos \frac{n_k}{\sigma} b,$$

ou encore

$$m_i \sin m_i a = \frac{h_a}{K_x} \cos m_i a,$$

$$\frac{n_k}{\sigma} \sin \frac{n_k}{\sigma} b = \frac{h_b}{K_y} \cos \frac{n_k}{\sigma} b,$$

et finalement

$$(13\,a) \qquad m_i a \operatorname{tg} m_i a = \frac{h_a}{K_x} a = \nu_a a$$

et

$$(13\,b) \qquad \frac{n_k}{\sigma} b \operatorname{tg} \frac{n_k}{\sigma} b = \frac{h_b}{K_y} b = \nu_b b$$

identiques aux relations (12) et (13) du problème précédent, dans lequel nous avons exposé comment on arrivait à trouver les racines $m_i a$ et $\frac{n_k}{\sigma} b$ de ces équations transcendantes.

Pour calculer les valeurs de $A_{i,k}$ nous faisons la réflexion suivante. Nous savons de la relation (6) du paragraphe 12, en combinaison avec les expressions (13) du même paragraphe que

$$1 = \sum_{i=1}^{i=\infty} \sum_{k=i}^{k=\infty} S_{m_i a} S_{\frac{n_k}{\sigma} b} \cos m_i x \cos \frac{n_k}{\sigma} y$$

d'où l'on déduit

$$(14) \qquad \beta = \beta \sum_{i=1}^{i=\infty} \sum_{k=1}^{k=\infty} S_{m_i a} S_{\frac{n_k}{\sigma} b} \cos m_i x \cos \frac{n_k}{\sigma} y,$$

et en comparant (14) avec (11), on voit que l'on a immédiatement

$$(m_i^2 + n_k^2) A_{i,k} = \beta S_{m_i a} S_{\frac{n_k}{\sigma} b},$$

et

$$(15\,a) \qquad A_{i,k} = \frac{\beta}{m_i^2 + n_k^2} S_{m_i a} S_{\frac{n_k}{\sigma} b},$$

Digitized by Google

ou explicitement

$$(15\,b)\qquad A_{i,k} = \frac{\beta}{m_i^2 + n_k^2}\,\frac{4\sin m_i a}{2m_i a + \sin 2m_i a}\,\frac{4\sin\frac{n_k}{\sigma}b}{2\frac{n_k}{\sigma}b + \sin 2\frac{n_k}{\sigma}b}.$$

Le problème se trouve ainsi complètement résolu. On calcule de (13) d'après la méthode indiquée les séries des valeurs de $m_i a$ et de $\frac{n_k}{\sigma}b$, et on tire de la table les valeurs des fonctions $S_{m_i a}$ et $S_{\frac{n_k}{\sigma}b}$.

Nous pouvons maintenant aller un peu plus loin. Lorsqu'il s'agit d'une bobine inductrice il faut tenir compte du fait que les pertes w par unité de volume ne sont pas constantes, mais varient avec la température à un endroit donné d'après la loi

$$(16\,a)\qquad w = w'(1 + \alpha\theta)$$

en désignant par w' les pertes, par unité de volume, calculées d'après la résistance de la bobine, à une température initiale θ'. On a donc aussi

$$(16\,b)\qquad \beta = \beta'(1 + \alpha\theta)$$

avec

$$(17)\qquad \beta' = \frac{w'}{K}.$$

L'équation de Poisson devient dans ces conditions :

$$(18)\qquad \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \sigma^2\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} + \beta'(1 + \alpha\theta) = 0.$$

Nous pouvons encore poser

$$\theta = \sum_{i=1}^{i=\infty}\sum_{k=1}^{k=\infty} A_{i,k}\cos m_i x\cos\frac{n_k}{\sigma}y,$$

les constantes $A_{i,k}$ n'ayant évidemment plus les mêmes valeurs que précédemment.

L'équation (18) devient

$$\beta' - \sum_{i=1}^{i=\infty}\sum_{k=1}^{k=\infty}(m_i^2 + n_k^2)A_{i,k}\cos m_i x\cos\frac{n_k}{\sigma}y + \alpha\beta'\sum_{i=1}^{i=\infty}\sum_{k=1}^{k=\infty}A_{i,k}\cos m_i x\cos\frac{n_k}{\sigma}y = 0,$$

ou en ajoutant dans les deux séries membre à membre

$$(19)\qquad \beta' = \sum_{i=1}^{i=\infty}\sum_{k=1}^{k=\infty}(m_i^2 + n_k^2 - \alpha\beta')A_{i,k}\cos m_i x\cos\frac{n_k}{\sigma}y,$$

ce qui donne dans ce cas pour $A_{i,k}$ la valeur

$$(20)\qquad A_{i,k} = \frac{\beta'}{m_i^2 + n_k^2 - \alpha\beta'}S_{m_i a}S_{\frac{n_k}{\sigma}b}.$$

Digitized by Google

Remarquons que la solution de la forme (7) ne permet pas de tenir compte de l'augmentation de la résistance de l'enroulement avec la température, tandis qu'avec notre solution le calcul s'effectue aussi simplement qu'en négligeant α.

14. — *Recherches expérimentales sur la répartition de la température dans une section droite d'une colonne de transformateur et comparaison avec la théorie.*

Dans le noyau en tôles d'un petit transformateur monophasé, de côtés $2a = 8$ cm et $2b = 13{,}5$ cm, on a incorporé 9 couples ther-

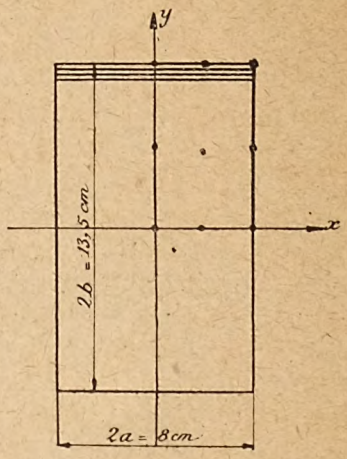


Fig. 24. — Coupe schématique de la colonne du transformateur avec indication des emplacements des couples thermo-électriques.

mo-électriques disposés comme l'indique la figure 24; pour contrôler dans la région soumise à l'expérience la variation de la température dans le sens axial du noyau, une deuxième série de couples analogue à la première a été disposée dans une section distante de quelques centimètres de la section comportant la première série. Mentionnons de suite que les deux séries de couples ont indiqué sensiblement les mêmes valeurs, ce qui a permis de faire abstraction de la troisième dimension et a réduit ce cas à une recherche en deux dimensions seulement.

La colonne soumise à l'expérience ne comportait pas d'enroulement et le transformateur a été excité par un enroulement disposé sur la deuxième colonne; on a fait deux expériences avec des pertes diffé-

Digitized by Google

rentes, dont l'une devait contrôler l'autre. Pour déterminer les pertes w en watts par cm³ on a divisé les pertes totales par le volume du transformateur, ce qui était permis vu que la section du transformateur était constante dans toutes ses parties.

On a obtenu pour le premier essai A

$$w_A = 0{,}0678\ w : \text{cm}^3,$$

et pour le deuxième essai B

$$w_B = 0{,}053\ w : \text{cm}^3.$$

Les températures observées sont représentées pour les deux essais

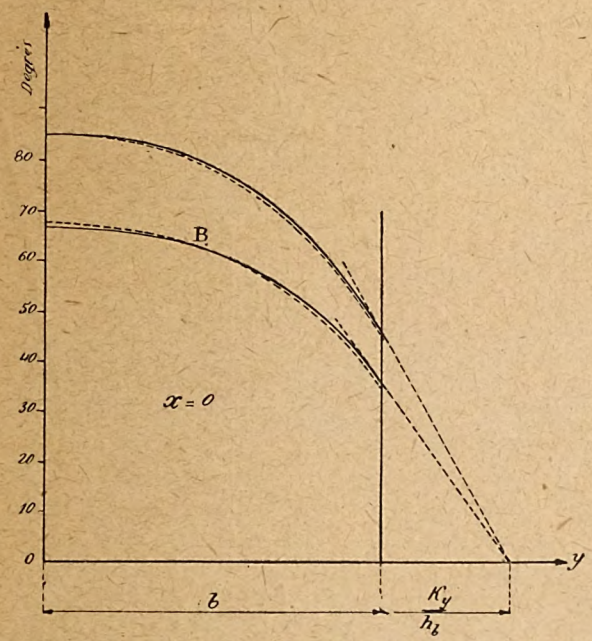


Fig. 25 *a*. — Courbes de répartition de la température dans le plan $x = o$ (disposition de la fig. 24).
Les courbes relevées expérimentalement sont tracées en pointillé.

par les courbes en pointillé des figures 25; la figure (25 *a*) représente la section $x = 0$ et la figure (25 *b*) la section $x = \frac{a}{2}$

Pour effectuer le calcul on ne connaissait que la conductibilité du fer dans le sens de la tôle, pour laquelle on a pris la valeur

$$K_x = 0{,}32\ \frac{w}{1° - \text{cm}},$$

donnée par LANGMUIR; on savait d'autre part que le coefficient d'émission de chaleur devait être, pour l'air au repos, de l'ordre de

Digitized by Google

$$2 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2}$$

pour la face lisse de la colonne, et que ce coefficient devait avoir une valeur quelque peu supérieure pour la face rugueuse que présentaient les tranches des tôles. On s'est arrêté, après quelques tâtonnements, aux valeurs suivantes pour h_a et h_b :

$$h_a = 3{,}00 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2},$$

$$h_b = 1{,}92 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}^2}.$$

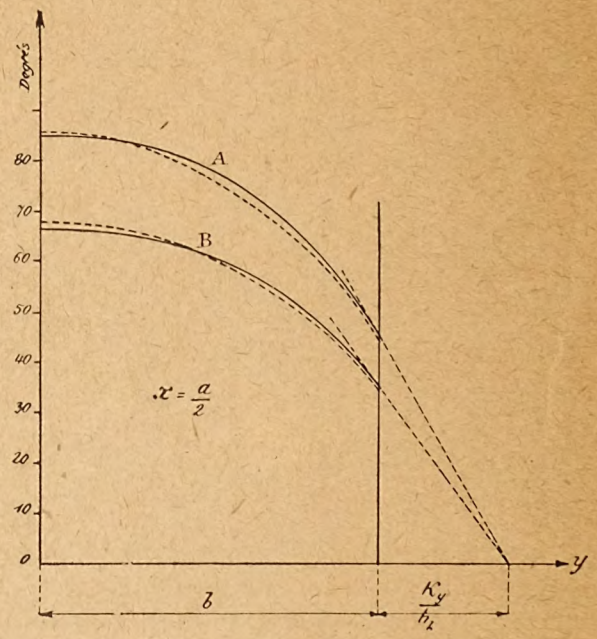


Fig. 25 *b*. — Courbes de répartition de la température dans le plan $x = \frac{a}{2}$ (disposition de la fig. 24).

Le dernier paramètre inconnu était la conductibilité transversale K_y des tôles et les essais avaient pour but de rechercher cette valeur. On connaissait toutefois l'ordre de grandeur de K_y qui pouvait être évalué en recherchant la conductibilité résultante de la tôle, du papier et d'une mince pellicule d'air; nous avons effectué ce calcul au paragraphe 1er et avons trouvé pour cette conductibilité la valeur de $0{,}005 \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$, et c'est précisément en adoptant cette valeur que l'on a le mieux pu faire cadrer le calcul avec l'expérience. On a donc

Digitized by Google

$$\sigma^2 = \frac{K_y}{K_x} = \frac{0{,}005}{0{,}32} = \frac{1}{64},$$

et

$$\sigma = \frac{1}{8}.$$

On obtient pour β les valeurs correspondant aux deux essais

$$\beta_A = \frac{0{,}0678}{0{,}32} = 0{,}212 \frac{1^\circ}{cm^2},$$

et

$$\beta_B = \frac{0{,}053}{0{,}32} = 0{,}165 \frac{1^\circ}{cm^2}.$$

On a d'autre part

$$\nu_a = \frac{h_a}{K_x} = \frac{3{,}00 \times 10^{-3}}{0{,}32} = 0{,}00938 \text{ cm}^{-1},$$

ce qui donne

$$\nu_a a = 0{,}00938 \times 4 = 0{,}0375.$$

On a de même

$$\nu_b = \frac{h_b}{K_y} = \frac{1{,}92 \times 10^{-3}}{0{,}005} = 0{,}384 \text{ cm}^{-1},$$

et

$$\nu_b b = 0{,}384 \times 6{,}75 = 2{,}59.$$

Il s'agit donc de résoudre le groupe d'équations :

$$m_i a \operatorname{tg} m_i a = 0{,}0375$$

$$\frac{n_k}{\sigma} b \operatorname{tg} \frac{n_k}{\sigma} b = 2{,}59.$$

Au paragraphe 12, nous avons indiqué en détail comment on parvenait aux solutions de ces équations, et avons indiqué les valeurs des fonctions $S_{m_1 a}$ et $S_{m_2 a}$ correspondant aux première et deuxième solutions de la première équation. On trouve sur la figure 23 par interpolation graphique sur les courbes 0,02 et 0,04 du système III

$$m_1 a = 0{,}1925 \quad \text{d'où} \quad m_1 = 0{,}0481$$

$$m_2 a = 3{,}1535 \quad \text{d'où} \quad m_2 = 0{,}788.$$

Recherchons au moyen de la table les valeurs de $S_{m_1 a}$ et $S_{m_2 a}$.

On a

$$m_1 a = \mu_1 = 0{,}1925.$$

On trouve pour $\mu = 0{,}19$ $S_{u_1} = 1{,}00601$,

et pour $\mu = 0{,}20$ $S_{u_1} = 1{,}00666$.

La différence pour les deux dernières décimales étant 65, on a pour la valeur de $\mu = 0{,}1925$

Digitized by Google

$$S_{m_1 a} = 1{,}00601 + 0{,}00065\,\frac{25}{100} = 1{,}00601 + 0{,}000163 = 1{,}006173$$

soit $1{,}0062$.

On a d'autre part

$$m_2 a = 3{,}1535 = \pi + 0.0119 = \pi + \mu_2.$$

Or on a pour $\mu = 0{,}01$ $S_{\mu_2} = -0{,}00633$

et pour $\mu = 0{,}02$ $S_{\mu_2} = -0{,}01257$

dont la différence est 0,00624; on a donc

$$S_{m_2 a} = -\left[0{,}00633 + 0{,}00624\,\frac{19}{100}\right] = -0{,}0075,$$

valeur négligeable par rapport à $S_{m_1 a}$.

La deuxième équation donne de la même façon

$\frac{n_1}{\sigma} b = 1{,}151,$	$\frac{n_1}{\sigma} = 0{,}1708,$	$S_{\frac{n_1}{\sigma} b} = +1{,}199033,$
$\frac{n_2}{\sigma} b = 3{,}746 = \pi + 0{,}604.$	$\frac{n_2}{\sigma} = 0{,}555,$	$S_{\frac{n_2}{\sigma} b} = -0{,}269604,$
$\frac{n_3}{\sigma} b = 6{,}654 = 2\pi + 0{,}371,$	$\frac{n_3}{\sigma} = 0{,}987,$	$S_{\frac{n_3}{\sigma} b} = +0{,}103700,$
$\frac{n_4}{\sigma} b = 9{,}686 = 3\pi + 0{,}261,$	$\frac{n_4}{\sigma} = 1{,}435,$	$S_{\frac{n_4}{\sigma} b} = -0{,}051944,$
$\frac{n_5}{\sigma} b = 12{,}766 = 4\pi + 0{,}200,$	$\frac{n_5}{\sigma} = 1{,}890,$	$S_{\frac{n_5}{\sigma} b} = +0{,}030660.$

La somme des cinq premières fonctions $S_{\frac{n_k}{\sigma} b}$ a la valeur 1 à 1 pour cent près.

Les valeurs de $A_{i,k}$ ont été calculées pour $i = 1$ seulement et pour $k = 1$ à 5. On obtient pour l'essai A :

$$A_{1,1} = 92{,}2; \quad A_{1,2} = -8{,}05; \quad A_{1,3} = +1{,}26;$$
$$A_{1,4} = -0{,}322; \quad A_{1,5} = +0{,}112.$$

La fonction θ donnant la température en un point x,y de la section devient ainsi pour l'essai A

$$\theta = [92{,}2 \cos 0{,}1708y - 8{,}05 \cos 0{,}555y + 1{,}26 \cos 0{,}987y - 0{,}322 \cos 1{,}435y + 0{,}112 \cos 1{,}89y] \cos 0{,}0481x.$$

L'essai B diffère de l'essai A par les valeurs des constantes $A_{i,k}$ qui sont toutes réduites dans le rapport $\frac{\beta_B}{\beta_A} = \frac{0{,}165}{0{,}212} = 0{,}783$. Les fonctions θ ainsi calculées et correspondant aux deux essais ont été portées en traits pleins dans les figures (25 *a* et 25 *b*), dans la première pour $x = 0$ et dans l'autre pour $x = \frac{6{,}75}{2}$ cm; on voit que la concordance entre la théorie et l'expérience est très satisfaisante.

Digitized by Google

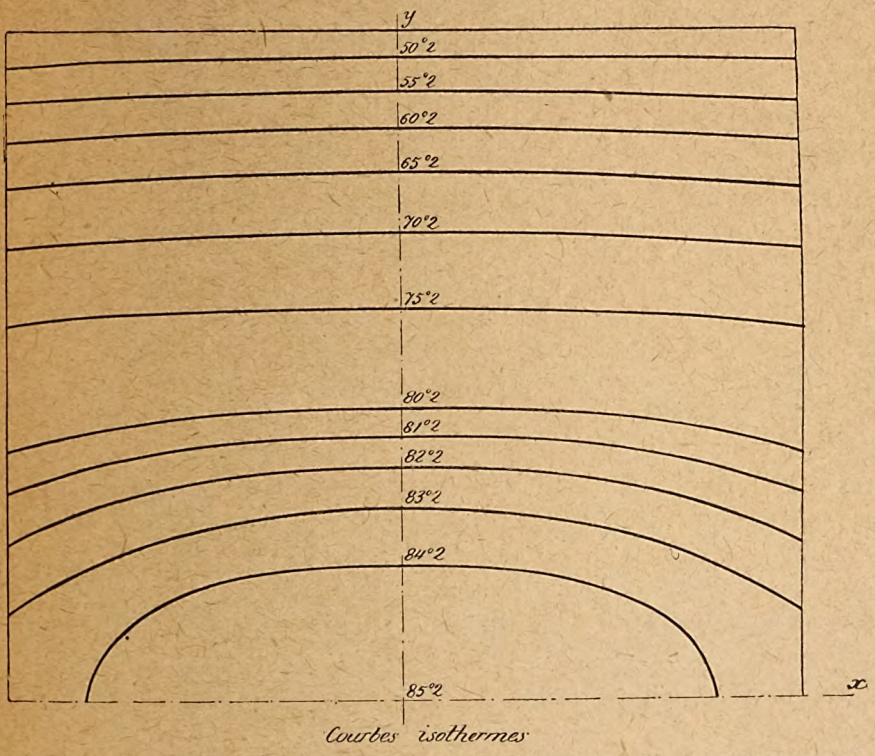


Fig. 26. — Les courbes isothermes dans la section droite de la colonne du transformateur (disposition de la fig. 24).

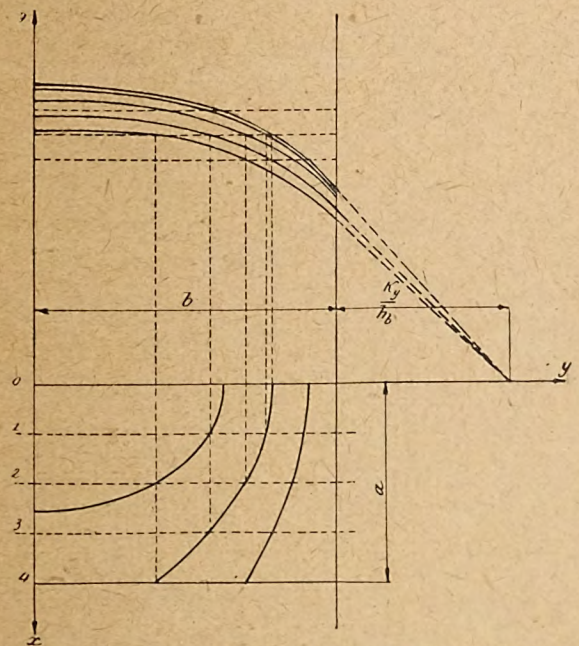


Fig. 27. — Construction des courbes isothermes.

Digitized by Google

On a appliqué à ces courbes la construction de la tangente indiquée au paragraphe 3.

Sur la figure 26, on a représenté les lignes isothermes correspondant à ces essais; ces courbes ont été obtenues en traçant les courbes de températures pour plusieurs valeurs de x (fig. 27), et en coupant ces courbes par des droites horizontales. Les projections des points d'intersection sur les droites d'ordonnées x correspondantes, donnent immédiatement les lignes isothermes.

15. — *La répartition de la température dans les sections droites d'une bobine inductrice, lorsque les conditions de refroidissement sont dissymétriques.*

Nous admettons maintenant que les coefficients d'émission de chaleur h sont différents sur les quatre faces, les autres conditions restant celles du problème précédent. Nous tenons compte de plus de la température θ_a de l'air ambiant; remarquons que cela n'entraîne aucune complication, mais nous faisons de ce fait un premier pas vers le problème général, où nous admettrons différentes les températures ambiantes sur les quatre faces.

Le présent problème nous donnera de nouveaux enseignements très utiles. Fourier n'a traité que des cas où les conditions de refroidissement étaient symétriques, et c'est à Lamé que nous devons les méthodes permettant la solution des cas où les coefficients d'émission de chaleur sont différents sur deux faces opposées. Mais Lamé, comme Fourier du reste, a admis la même température ambiante sur toutes les faces et n'a traité que des cas répondant à l'équation de Laplace.

Nous désignons les coefficients d'émission de chaleur par h_a sur la face dont l'abscisse est a et par h'_a, sur celle dont l'abscisse est $-a$, de même par h_b et h'_b respectivement ceux des faces ayant pour ordonnées b et $-b$. Nous écrivons maintenant, en suivant, pour exprimer la dissymétrie, les enseignements de Lamé

$$(1) \qquad \theta = \sum_{i=1}^{i=\infty} \sum_{k=1}^{k=\infty} A_{i,k} \cos(m_i x + \varphi_i) \cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right) + \theta_a,$$

σ ayant la valeur exprimée par la formule (2) du paragraphe 13.

Disposant de deux nouvelles conditions aux limites, la solution doit nécessairement comporter deux nouvelles inconnues φ et ψ.

Dans les cas symétriques que nous avons traités jusqu'à présent, la fonction θ était toujours représentée par des cosinus, ou produits de cosinus, fonctions paires. Les nouvelles fonctions, $\cos(mx + \varphi)$ et

Digitized by Google

$\cos(ny + \psi)$ introduisent maintenant des sinus, fonctions impaires, qui permettent d'exprimer analytiquement la dissymétrie.

Nous tirons immédiatement de l'équation de Poisson (relation (1 b) du paragraphe 13), en suivant les raisonnements de ce paragraphe :

$$(2) \qquad \beta = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}(m_i^2 + n_k^2)A_{i,k}\cos(m_i x + \varphi_i)\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y + \psi_k\right),$$

β ayant encore la signification donnée par la relation (3) du paragraphe 13.

Les conditions aux limites sont maintenant :

$$(3\,a) \qquad -K_x\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=+a} = h_a(\theta_{x=+a} - \theta_a),$$

$$(3\,b) \qquad +K_x\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{x=-a} = h'_a(\theta_{x=-a} - \theta_a),$$

$$(4\,a) \qquad -K_y\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)_{y=+b} = h_b(\theta_{y=+b} - \theta_a),$$

$$(4\,b) \qquad +K_y\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)_{y=-b} = h'_b(\theta_{y=-b} - \theta_a).$$

Nous désignons par ν_a, ν'_a, ν_b, ν'_b les rapports

$$(5) \qquad \nu_a = \frac{h_a}{K_x}, \quad \nu'_a = \frac{h'_a}{K_x}, \quad \nu_b = \frac{h_b}{K_y}, \quad \nu'_b = \frac{h'_b}{K_y},$$

et obtenons en effectuant sur (1) les opérations indiquées par (3 a)

$$\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} m_i A_{i,k}\sin(m_i a + \varphi_i)\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y + \psi_k\right) = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}\nu_a A_{i,k}\cos(m_i a + \varphi_i)\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y + \psi_k\right),$$

ou en comparant dans les deux termes membre à membre

$$(6\,a) \qquad m_i \sin(m_i a + \varphi_i) = \nu_a \cos(m_i a + \varphi_i)$$

ou

$$(6\,b) \qquad m_i a \operatorname{tg}(m_i a + \varphi_i) = \nu_a a.$$

On obtient de même par (3 b)

$$\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} -m_i A_{i,k}\sin(-m_i a + \varphi_i)\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y + \psi_k\right) = \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}\nu'_a A_{i,k}\cos(-m_i a + \varphi_i)\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y + \psi_k\right),$$

ce qui donne

$$(7\,a) \qquad m_i \sin(m_i a - \varphi_i) = \nu'_a \cos(m_i a - \varphi_i)$$

ou

$$(7\,b) \qquad m_i a \operatorname{tg}(m_i a - \varphi_i) = \nu'_a a.$$

Le groupe d'équations transcendantes (6 b) et (7 b) a une infinité de racines. Nous verrons plus loin comment il est possible de calculer les

Digitized by Google

séries de valeurs de m_i et φ_i qui satisfont par couples aux équations (6) et (7).

Nous trouvons de la même façon pour n_k et ψ_k

$$\frac{n_k}{\sigma} b \operatorname{tg}\left(\frac{n_k}{\sigma} b + \psi_k\right) = \nu_b b, \tag{8}$$

et

$$\frac{n_k}{\sigma} b \operatorname{tg}\left(\frac{n_k}{\sigma} b - \psi_k\right) = \nu'_b b. \tag{9}$$

Désignons maintenant par m_j une solution quelconque, autre que m_i, de l'équation (6).

Nous avons évidemment

$$m_i \operatorname{tg}(m_i a + \varphi_i) = m_j \operatorname{tg}(m_j a + \varphi_j),$$

et

$$m_i \operatorname{tg}(m_i a - \varphi_i) = m_j \operatorname{tg}(m_j a - \varphi_j),$$

ou encore

$$m_i \sin(m_i a + \varphi_i) \cos(m_j a + \varphi_j) - m_j \sin(m_j a + \varphi_j) \cos(m_i a + \varphi_i) = 0, \tag{10 a}$$

et

$$m_i \sin(m_i a - \varphi_i) \cos(m_j a - \varphi_j) - m_j \sin(m_j a - \varphi_j) \cos(m_i a - \varphi_i) = 0. \tag{10 b}$$

Pour isoler les coefficients $A_{i,k}$ nous multiplions (2), d'abord par $\cos(m_i x + \varphi_i)dx$ en intégrant entre $-a$ et $+a$, et ensuite par $\cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right)dy$, en intégrant entre $-b$ et $+b$. Or on a

$$\int_{-a}^{+a} \cos(m_i x + \varphi_i) dx = \left[\frac{\sin(m_i x + \varphi_i)}{m_i}\right]_{-a}^{+a} = \frac{\sin(m_i a + \varphi_i) + \sin(m_i a - \varphi_i)}{m_i} \tag{11 a}$$

$$\int_{-a}^{+a} \cos^2(m_i x + \varphi_i) dx = \left[\frac{2m_i x + \sin 2(m_i x + \varphi_i)}{4m_i}\right]_{-a}^{+a} = \frac{4m_i a + \sin 2(m_i a + \varphi_i) + \sin 2(m_i a - \varphi_i)}{4m_i}, \tag{11 b}$$

et enfin

$$\int_{-a}^{+a} \cos(m_i x + \varphi_i) \cos(m_j x + \varphi_j) dx = \frac{m_i \sin(m_i a + \varphi_i) \cos(m_j a + \varphi_j) - m_j \sin(m_j a + \varphi_j) \cos(m_i a - \varphi_i)}{m_i^2 - m_j^2} + \frac{m_i \sin(m_i a - \varphi_i) \cos(m_j a - \varphi_j) - m_j \sin(m_j a - \varphi_j) \cos(m_i a - \varphi_i)}{m_i^2 - m_j^2},$$

ce qui, d'après les relations (10) est égal à zéro, donc

$$\int_{-a}^{+a} \cos(m_i x + \varphi_i) \cos(m_j x + \varphi_j) dx = 0. \tag{11 c}$$

Digitized by Google

On obtient des relations tout à fait analogues pour le facteur $\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y + \psi_k\right)dy$, après intégration entre les limites $-b$ et $+b$. En effectuant l'opération indiquée plus haut on fait donc disparaître dans le deuxième membre tous les termes pour lesquels i et j, ou n_k et n, diffèrent, et il ne subsiste que celui correspondant à $j = i$ et $j = k$ et qui vient de

$$\int_{-a}^{+a} \cos^2(m_i x + \varphi_i)dx \int_{-b}^{+b} \cos^2\left(\frac{n_k}{\sigma}y + \psi_k\right)dy.$$

On obtient donc

$$\beta \frac{\sin(m_i a + \varphi_i) + \sin(m_i a - \varphi_i)}{m_i} \frac{\sin\left(\frac{n_k}{\sigma}b + \psi_k\right) + \sin\left(\frac{n_k}{\sigma}b - \psi_k\right)}{\frac{n_k}{\sigma}}$$

$$= (m_i^2 + n_k^2)A_{i,k} \frac{4m_i a + \sin(2m_i a + \varphi_i) + \sin(2m_i a - \varphi_i)}{4m_i}$$

$$\frac{4\frac{n_k}{\sigma}b + \sin\left(2\frac{n_k}{\sigma}b + \psi_k\right) + \sin\left(2\frac{n_k}{\sigma}b - \psi_k\right)}{4\frac{n_k}{\sigma}},$$

ce qui donne finalement, en tenant compte de ce que

$$\sin(m_i a + \varphi_i) + \sin(m_i a - \varphi_i) = 2\sin m_i a \cos\varphi_i$$

$$(12)\quad A_{i,k} = \frac{\beta}{m_i^2 + n_k^2} \frac{4\sin m_i a\cos\varphi_i}{2m_i a + \sin 2m_i a\cos 2\varphi_i} \frac{4\sin\frac{n_k}{\sigma}b\cos\psi_k}{2\frac{n_k}{\sigma}b + \sin 2\frac{n_k}{\sigma}b\cos 2\psi_k}.$$

Par analogie avec la désignation introduite au paragraphe 12, nous appelons les facteurs de $\frac{\beta}{m_i^2 + n_k^2}$,

$$(13\,a)\qquad \frac{4\sin m_i a\cos\varphi_i}{2m_i a + \sin 2m_i a\cos 2\varphi_i} = S_{m_i a,\varphi_i},$$

et

$$(13\,b)\qquad \frac{4\sin\frac{n_k}{\sigma}b\cos\psi_k}{2\frac{n_k}{\sigma}b + \sin 2\frac{n_k}{\sigma}b\cos 2\psi_k} = S_{\frac{n_k}{\sigma}b,\psi_k}.$$

Les fonctions S_u sont à réunir dans une table pour faciliter les calculs, mais ce travail, très long, n'a pas encore pu être terminé jusqu'à présent.

Pour tenir compte de l'augmentation de la résistance du cuivre avec la température, les formules précédentes sont toutes valables; il suffit

Digitized by Google

d'écrire, conformément à ce qui a été démontré par les relations (16) à (20) du paragraphe 13

$$(12\,a) \qquad A_{i,k} = \frac{\beta'}{m_i^2 + n_k^2 - \alpha\beta'} S_{m_i a, \varphi_i} S_{\frac{n_k}{\sigma} b, \varphi_k}.$$

Le problème est ainsi complètement résolu; il ne nous reste qu'à indiquer le moyen de résoudre les équations transcendantes (6) et (7). Pour cela nous laissons d'abord la parole à LAMÉ, qui, le premier, a trouvé la solution des problèmes comportant des conditions de refroidissement dissymétriques, pour indiquer ensuite comment la figure

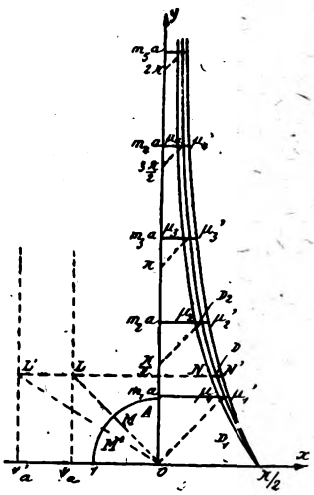


Fig. 28. — Construction de Lamé pour la résolution du système d'équations $\begin{cases} mia \operatorname{tg}(mia + \varphi) = va. \\ mia \operatorname{tg}(mia + \varphi) = v'a. \end{cases}$

23 inspirée des idées de cet auteur, peut servir également dans des cas plus compliqués.

Nous nous en rapportons à la figure 28 tirée de l'ouvrage de LAMÉ (1), et citons ce grand savant, en adaptant légèrement son texte à nos développements et en modifiant les notations.

« Tout terme simple, qui doit être une intégrale particulière de l'équation de LAPLACE peut être pris sous la forme

$$(14) \qquad \cos(mx + \varphi)$$

où le paramètre m et l'arc complémentaire φ sont des constantes. Pour qu'il vérifie les conditions aux limites, il faut que l'on ait

(1) V. Bibliographie.

Digitized by Google

$$\text{(15)} \qquad \operatorname{tg}(ma+\varphi)=\frac{\nu}{m}=\operatorname{tg}\mu,$$

$$\operatorname{tg}(ma-\varphi)=\frac{\nu'}{m}=\operatorname{tg}\mu',$$

μ et μ' désignant les deux arcs, moindres que $\frac{\pi}{2}$, dont les tangentes reproduisent les quotients de ν et ν' par m. C'est-à-dire que les arcs $(ma+\varphi)$ et $(ma-\varphi)$ doivent être deux multiples de π, augmentés de μ et μ'; ce qui donne les équations

$$ma+\varphi=j\pi+\mu, \qquad ma-\varphi=j'\pi+\mu',$$

d'où l'on déduit, en remplaçant la somme de $(j+j')\pi$ des deux multiples par un seul $(i-1)\pi$, et observant que le complément φ peut être augmenté de $j'\pi$, sans changer la valeur absolue de (14)

$$\text{(16)} \qquad ma=\frac{(i-1)\pi+\mu+\mu'}{2},$$

$$\varphi=\frac{(i-1)\pi+\mu-\mu'}{2},$$

la première valeur de i étant $i=1$

Les groupes (15) et (16) donnent pour ma les trois valeurs égales

$$\text{(17)} \qquad \frac{\nu_a}{\operatorname{tg}\mu}=\frac{\nu'_a}{\operatorname{tg}\mu'}=\frac{(i-1)\pi+\mu+\mu'}{2},$$

et cette équation multiple doit déterminer les augments μ et μ' pour chaque valeur de i.

La figure 28 indique le moyen de déterminer graphiquement les augments (μ_i, μ'_i) et les produits $m_i a$, qui correspondent à tous les entiers i, à partir de 1.

A l'exception de A, les divers points marqués sur l'axe vertical des y, et sur l'axe horizontal des x, sont désignés par leur distance à l'origine 0. Dans le faisceau des trois courbes, la moyenne, que nous appellerons diamétrale, passe par le milieu des cordes horizontales qui aboutissent aux deux autres. Ces dernières ont pour équations

$$\text{(18)} \qquad y=\frac{\nu_a}{\operatorname{tg}x} \quad \text{et} \quad y=\frac{\nu'_a}{\operatorname{tg}x};$$

elles coupent l'axe des x au même point $\frac{\pi}{2}$, et s'approchent asymptotiquement de l'axe des y. Leur construction par points est indiquée; la parallèle aux x, menée par l'extrémité d'une ordonnée Oy, coupe les verticales élevées en ν_a et ν'_a aux points L et L'; les hypoténuses OL, OL', tracent sur le quart de cercle de rayon 1 dont le centre est en O, deux points, M, M'; les arcs AM, AM', étant développés sur yN, yN',

Digitized by Google

les points N, N′ appartiennent aux deux courbes (18), et le milieu D de NN′ à la diamétrale.

D'après cette construction, μ et μ' étant les abscisses de N et N′, la moyenne $\frac{1}{2}(\mu + \mu')$ sera celle de D, et l'on aura une solution de l'équation multiple (17), si l'ordonnée commune, qui sera alors *ma*

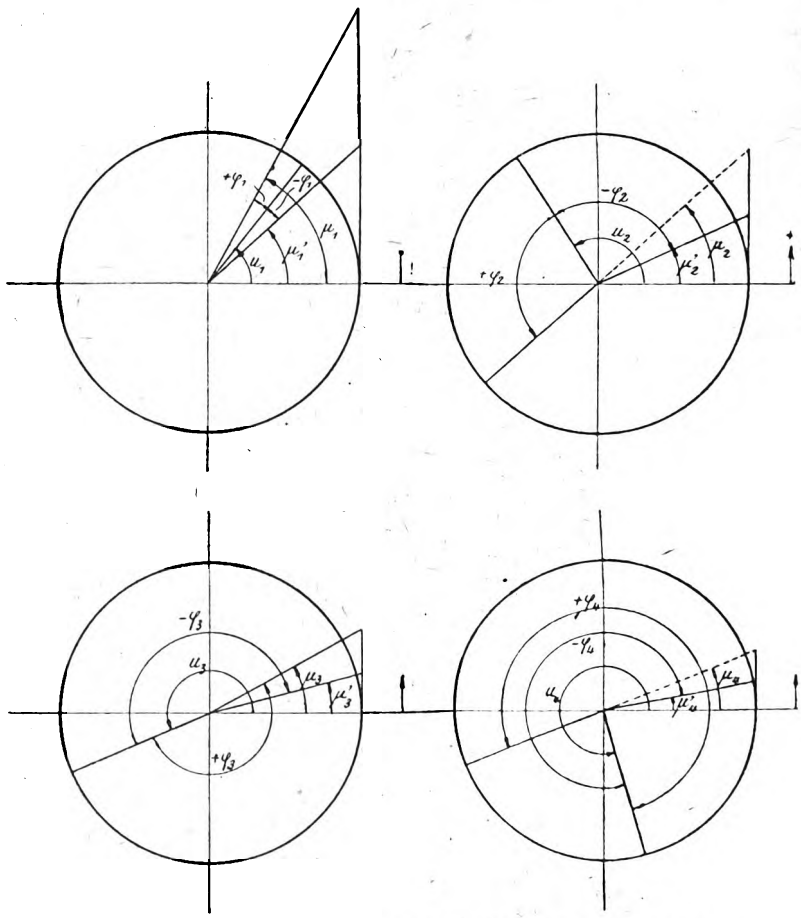


Fig. 29. — Les quatre premières solutions du système d'équations

$$\begin{cases} u \operatorname{tg}(u+\varphi) = 2. \\ u \operatorname{tg}(u+\varphi) = 1. \end{cases}$$

(16), surpasse cette moyenne d'un multiple de $\frac{\pi}{2}$. Donc, la diamétrale étant tracée, par tout point $(i-1)\frac{\pi}{2}$, de l'axe des y, on mènera une droite inclinée à 45°, laquelle coupera la diamétrale au point D_i, dont l'ordonnée sera $m_i a$ et l'abscisse $\frac{1}{2}(\mu_i + \mu'_i)$.

Digitized by Google

Cette détermination graphique montre clairement que les augments μ et μ' changent avec i. Et puisque les entiers i sont en nombre infini, il existe pareillement une infinité de couples (m, φ), tous inégaux, lesquels donnent autant de termes simples (14) satisfaisant à l'équation de LAPLACE ».

Les explications de LAMÉ seront comprises plus facilement en examinant la fig. 29, qui donne les quatre premières solutions $m_i a$ et φ_i de l'équation (6). Il existe maintenant une racine $m_i a$ dans chaque quadrant, et les angles φ_i sont toujours tels que les tangentes des angles $\alpha_i = (m_i a + \varphi_i)$ et $\alpha'_i = (m_i a - \varphi_i)$ sont ramenés aux quadrants impairs, rendant positives les valeurs de leurs tangentes.

Pour expliquer l'emploi de la figure 23 dans les cas dissymétriques, nous avons encore recours à un exemple concret. Soit

(19) $$u \operatorname{tg} (u + \varphi) = 2,$$

et $$u \operatorname{tg} (u - \varphi) = 1.$$

Les racines seront données maintenant par toutes les droites parallèles, aussi bien par celles en traits pleins que par celles en pointillé.

Nous prenons à titre d'exemple la deuxième droite du système I, qui coupe les courbes 1 et 2 [1 et 2 étant les valeurs des seconds membres de (19)] de ce même système en a et a'; on cherche par approximation une droite horizontale cd telle que la section b_2, b'_2, découpée sur elle par les courbes 1 et 2, soit divisée par a, a' en deux parties égales. L'ordonnée de cette droite cd est alors la deuxième racine u_2 du système d'équations (19), et les abscisses de b_2 et b'_2 donnent respectivement les excédents μ_2 et μ'_2. De même, la droite cd d'ordre i, c'est-à-dire coupant l'axe vertical en $(i - 1)\frac{\pi}{2}$, donne la solution u_i et les excédents μ_i et μ'_i. La longueur $\frac{b_2 b'_2}{2}$ d'autre part est égale à

$$\varphi_2 - \frac{\pi}{2}, \qquad \text{d'où} \qquad \varphi_2 = \frac{b_2 b'_2}{2} + \frac{\pi}{2},$$

et on a en général pour la racine φ_i

(20) $$\varphi_i = \frac{b_i b'_i}{2} + (i - 1)\frac{\pi}{2}.$$

16. — *Recherches expérimentales sur la répartition de la température dans une section d'une bobine inductrice et comparaison avec la théorie.*

M. E. H. RAYNER a été chargé par le National Physical Laboratory de

Digitized by Google

Londres, d'effectuer des recherches expérimentales sur la répartition de la température dans les bobines inductrices. Ses expériences ont été faites sur une série de machines à courant continu, de constructions diverses, et les résultats de ses recherches ont été consignés dans un rapport de grande valeur, qui a été publié par la *British Standards Association* (1). Nous avons choisi, pour comparer la théorie avec l'expérience, la bobine n° 9 de son rapport, sur laquelle plusieurs essais

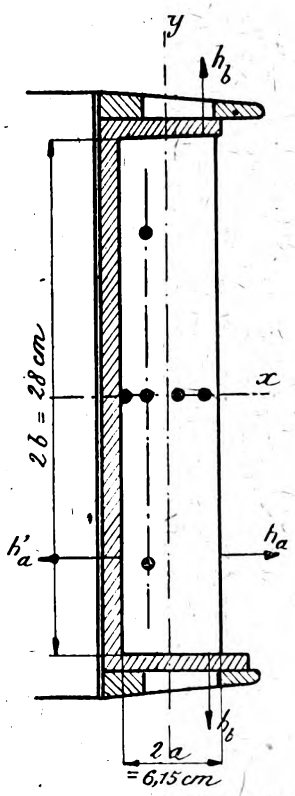


Fig. 30. — Coupe schématique de la bobine inductrice avec indication des emplacements des couples thermo-électriques.

ont été effectués; la figure 30 donne une coupe de la bobine avec la disposition des couples thermo-électriques.

Lors d'un premier essai A la bobine était fortement isolée sur sa surface extérieure, ce qui a provoqué un échauffement assez élevé; dans un deuxième essai B cette isolation a été supprimée pour déterminer l'échauffement.

Nous indiquons dans la figure 30 la disposition des axes de coordonnées, ainsi que la désignation des différents coefficients d'émission

(1) V. Bibliographie.

Digitized by Google

de chaleur. On voit que l'on a affaire à un cas dissymétrique dans le sens des x, et symétrique dans le sens des y.

M. RAYNER ne donne ni les épaisseurs, ni la constitution des isolations *qui séparaient* le cuivre du fer, ou de celle qui entourait la bobine. Il a *donc* été impossible de calculer les valeurs des différents coefficients d'émission résultants, et il a fallu agir par tâtonnements, en restant naturellement pour les valeurs de ces coefficients dans les limites de la pratique. On s'est arrêté aux valeurs suivantes, valables pour les deux essais

$$h'_a = 0{,}83 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}},$$

$$h_b = 2{,}14 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}.$$

Pour le premier essai on a pris

$$h_{a\text{A}} = 1{,}58 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}},$$

et pour le deuxième

$$h_{a\text{B}} = 8{,}36 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}.$$

Une autre inconnue était la température θ_a de l'air entourant la bobine, pour laquelle on ne pouvait pas prendre la valeur de 20°C, que M. RAYNER avait donnée pour la température de l'air ambiant, car l'air qui soufflait sur la bobine devait déjà avoir subi une certaine augmentation de température. On a choisi $\theta_0 = 30°\text{C}$ pour le premier essai et $\theta_a = 27°{,}5\text{C}$ pour le deuxième. Pour la conductibilité de l'isolation au coton entourant les conducteurs, la valeur de

$$K_i = 1{,}34 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}},$$

légèrement supérieure à celle donnée par M. VIDMAR, a amené à des résultats concordants pour les deux essais. Nous avons vu par l'exemple calculé au paragraphe 1er, tiré du présent problème, que cette valeur de K_i donnait une conductibilité résultante de l'isolation et du coton de $K_r = 10{,}45 \times 10^{-3} \frac{w}{1^\circ - \text{cm}}$. L'isolation entre fils d'une même rangée, et entre fils de deux rangées différentes était la même, ce qui donne $K_x = K_y$ et $\sigma = 1$.

Des données publiées par M. RAYNER, on tire directement

Pour l'essai A,

$$w_\text{A} = 12{,}8 \times 10^{-3} w : \text{cm}^3, \qquad \beta_\text{A} = 1{,}25 \frac{1^\circ}{\text{cm}^2},$$

Digitized by Google

et pour l'essai B,

$$w_B = 12{,}0 \times 10^{-3} w : \text{cm}^3, \qquad \beta_B = 1{,}15 \frac{1^\circ}{\text{cm}^2}.$$

La figure 30 donne de plus

$$2a = 6{,}15 \text{ cm}, \qquad 2b = 28{,}0 \text{ cm}.$$

Les conditions de refroidissement étant dissymétriques dans le sens des x, on est amené à rechercher pour le premier essai les racines multiples du groupe d'équations

$$(1\,a) \qquad m_i a \operatorname{tg}(m_i a + \varphi_i) = \frac{h_a}{K_r} a = \frac{1{,}58}{10{,}45} \frac{6{,}15}{2} = 0{,}454,$$

$$(1\,b) \qquad m_i a \operatorname{tg}(m_i a - \varphi_i) = \frac{h'_a a}{K_r} = \frac{0{,}83}{10{,}45} \frac{6{,}15}{2} = 0{,}239,$$

et pour le deuxième essai

$$(2\,a) \qquad m_i a \operatorname{tg}(m_i a + \varphi_i) = \frac{8{,}36}{10{,}45} \frac{6{,}15}{2} = 2{,}405,$$

la deuxième étant la même que celle du groupe (1).

Dans le sens des y on obtient pour les deux essais la même équation unique :

$$(3) \qquad n_k b \operatorname{tg} n_k b = \frac{2{,}14}{10{,}45} \frac{28}{2} = 2{,}87.$$

Suivant les instructions données au paragraphe précédent pour la recherche de la première racine du groupe I, on trace, de la façon indiquée, dans le voisinage des intersections de la première droite oblique du système II, avec les courbes 0,2 et 0,4 du même système, les courbes 0,239 et 0,454 et on cherche la ligne horizontale $b_1 b'_1$, reliant les deux courbes, qui est divisée en deux parties égales par la droite II. L'ordonnée de $b_1 b'_1$ est 0,56, mesurée sur l'échelle II; on a donc

$$m_1 a = 0.56 \quad \text{d'où} \quad m_1 = 0.183$$

La longueur $b_1 b'_1$ représente un angle de 0.28 radian, ce qui donne pour φ_1 la valeur

$$\varphi_1 = 0.14.$$

On obtient donc, tous calculs faits

$$S_{m_1 a, \varphi_1} = \frac{4 \sin m_1 a \cos \varphi_1}{2 m_1 a + \sin 2 m_1 a \cos 2\varphi_1} = +1{,}06.$$

En procédant de même pour $S_{m_2 a, \varphi_2}$ on trouve que sa valeur est négligeable par rapport à $S_{m_1 a, \varphi_1}$.

Pour le groupe (2) on obtient comme première racine $m_1 = 0{,}258$, $\varphi_1 = 0{,}48$

Digitized by Google

ce qui donne pour $S_{m_1 a,\varphi_1}$ la valeur

$$S_{m_1 a,\varphi_1} = + 1.170.$$

Le terme $S_{m_2 a,\varphi_2}$ peut également être négligé.

L'équation (3) donne comme solutions

$$n_1 = 0{,}0844 \quad \text{et} \quad S_{n_1 b} = + 1{,}208,$$
$$n_2 = 0{,}271 \quad \text{et} \quad S_{n_2 b} = - 0{,}283,$$
$$n_3 = 0{,}478 \quad \text{et} \quad S_{n_3 b} = + 0{,}112,$$
$$n_4 = 0{,}694 \quad \text{et} \quad S_{n_4 b} = - 0{,}057.$$

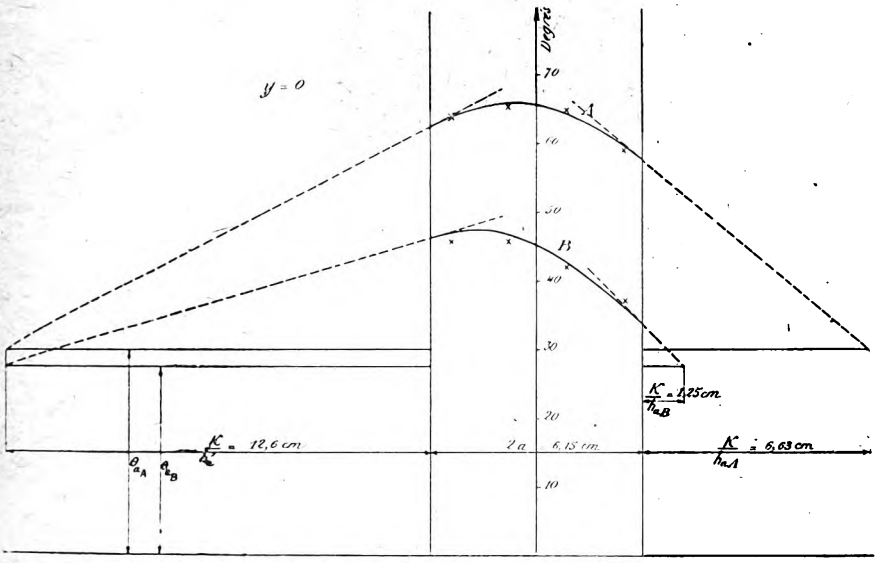


Fig. 31 *a*. — Courbes de répartition de la température dans le plan $y = o$ (disposition de la fig. 30).

On obtient ainsi pour l'essai A les valeurs des constantes

$$A_{1,1} = + 38{,}6°C, \quad A_{1,2} = - 3{,}44°C, \quad A_{1,3} = + 0{,}55°C,$$
$$A_{1,4} = - 0{,}144°C,$$

la dernière valeur étant négligeable.

La fonction θ donnant la valeur de la température à un endroit x,y est donc

$$\theta_A = 30 + [38{,}6 \cos 0{,}0844y - 3{,}44 \cos 0{,}271y + 0{,}55 \cos 0{,}478y] \cos (0{,}183x + 0{,}14).$$

On obtient de même pour l'essai B

$$A_{1,1} = + 22{,}0°C, \quad A_{1,2} = - 2{,}72°C, \quad A_{1,3} = 0{,}51°C,$$

et pour la fonction θ_B,

$$\theta_B = 27{,}5 + [22 \cos 0{,}0844y - 2{,}72 \cos 0{,}271y + 0{,}51 \cos 0{,}478y] \cos (0{,}258x + 0{,}48).$$

Digitized by Google

Les résultats de ces calculs ont été portés pour les deux essais dans les figures (31 *a*) et (31 *b*), la première se rapportant à $x = -0.84$ et la deuxième à $y = 0$. Les points marqués sur ces figures représentent les températures mesurées par M. RAYNER. On voit que la concordance entre calcul et essai est très satisfaisante.

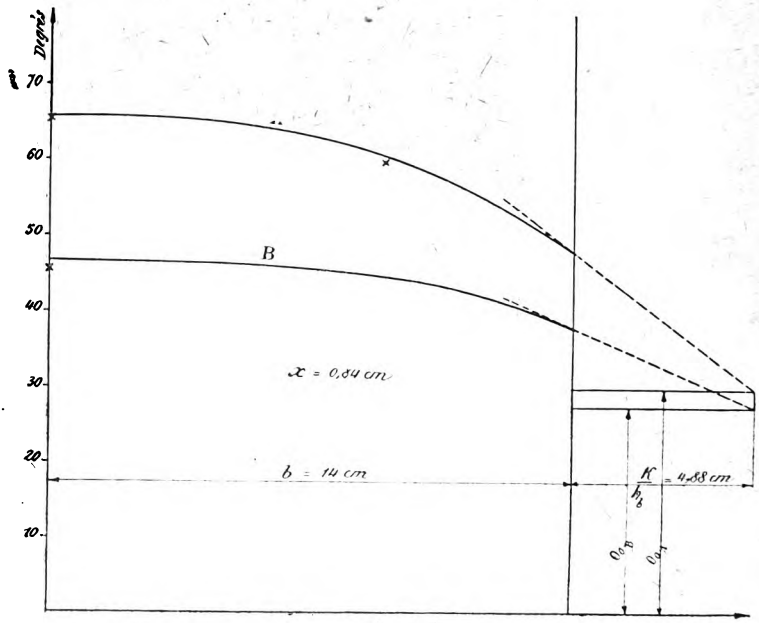


Fig. 31 *b*. — Courbes de répartition de la température dans le plan $x = -0{,}84$ cm (disposition de la fig. 30).

Nous n'avons pas tenu compte dans ce calcul du coefficient de variation de la résistance avec la température α; cela aurait pu se faire aisément, mais on a trouvé que son influence dans ces deux cas était très faible.

17. — *Cas général de la répartition de la température dans la section d'une bobine inductrice.*

Nous admettons que non seulement les quatre coefficients d'émission de chaleur, mais aussi que les températures de l'air ambiant sur les quatre faces sont différentes, et désignons ces températures par 0_a, $0'_a$, 0_b, $0'_b$, correspondant respectivement aux coefficients h_a, h'_a, h_b, h'_b ou aux rapports ν_a, ν'_a, ν_b, ν'_b. Nous écrivons dans ce cas

$$0 = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{i,k} \cos(m_i x + \varphi_i) \cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right)$$

Digitized by Google

$$(1)\qquad + \sum_{k=1}^{\infty} P_k \cosh(n_k x + \gamma_k) \cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right) + \sum_{i=1}^{\infty} Q_i \cos(m_i x + \varphi_i) \cosh\left(\frac{m_i}{\sigma} y + \delta_i\right),$$

en introduisant quatre nouvelles inconnues, les constantes Q_i et P_k, ainsi que les angles δ_i et γ_k.

Les deux derniers termes du deuxième membre satisfont identiquement à l'équation de LAPLACE. On peut donc écrire immédiatement pour $A_{i,k}$ la valeur donnée par la formule (12) du paragraphe 15 :

$$(2)\qquad A_{i,k} = \frac{\beta}{m_i^2 + n_k^2} S_{m_i a \cdot \varphi_i} S_{\frac{n_k}{\sigma} b, \psi_k}.$$

D'autre part il est facile de se convaincre, en effectuant les calculs, que si l'on pose

$$(3\,a)\qquad m_i a \operatorname{tg}(m_i a + \varphi_i) = \nu_a a,$$

$$(3\,b)\qquad m_i a \operatorname{tg}(m_i a - \varphi_i) = \nu'_a a,$$

$$(4\,a)\qquad \frac{n_k}{\sigma} b \operatorname{tg}\left(\frac{n_k}{\sigma} b + \psi_k\right) = \nu_b b,$$

$$(4\,b)\qquad \frac{n_k}{\sigma} b \operatorname{tg}\left(\frac{n_k}{\sigma} b - \psi_k\right) = \nu'_b b,$$

conformément aux formules 6, 7, 8 et 9 du même paragraphe, les conditions aux limites

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{x=+a} = -\nu_a \theta_{x=+a} + \nu_a \theta_a, \qquad \left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{x=-a} = \nu'_a \theta_{x=-a} - \nu'_a \theta'_a,$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)_{y=+b} = -\nu_b \theta_{y=+b} + \nu_b \theta_b, \qquad \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)_{y=-b} = \nu'_b \theta_{y=-b} - \nu'_b \theta'_b,$$

donnent

$$(5)\qquad \begin{cases} \sum_{k=1}^{\infty} P_k [n_k \sinh(n_k a + \gamma_k) + \nu_a \cosh(n_k a + \gamma_k)] \cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right) = \nu_a \theta_a, \\ \sum_{k=1}^{\infty} P_k [n_k \sinh(n_k a - \gamma_k) + \nu'_a \cosh(n_k a - \gamma_k)] \cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right) = \nu'_a \theta'_a, \end{cases}$$

et

$$(6)\qquad \begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} Q_i \left[\frac{m_i}{\sigma} \sinh\left(\frac{m_i}{\sigma} b + \delta_i\right) + \nu_b \cosh\left(\frac{m_i}{\sigma} b + \delta_i\right)\right] \cos(m_i x + \varphi_i) = \nu_b \theta_b, \\ \sum_{i=1}^{\infty} Q_i \left[\frac{m_i}{\sigma} \sinh\left(\frac{m_i}{\sigma} b - \delta_i\right) + \nu'_b \cosh\left(\frac{m_i}{\sigma} b - \delta_i\right)\right] \cos(m_i x + \varphi_i) = \nu'_b \theta'_b. \end{cases}$$

Digitized by Google

On isole dans les relations (5) et (6) les termes constants, facteurs respectivement de $\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y+\psi_k\right)$ et de $\cos(m_i x+\varphi_i)$ en multipliant les deux membres de (5) par $\cos\left(\frac{n_k}{\sigma}y+\psi_k\right)dy$, et en intégrant entre $-b$ et $+b$, de même pour (6), en multipliant par $\cos(m_i x+\varphi_i)dx$ et en intégrant entre $-a$ et $+a$.

On obtient immédiatement pour ces termes :

$$(7\,a)\qquad P_k[n_k\sinh(n_k a+\gamma_k)+\nu_a\cosh(n_k a+\gamma_k)]=\nu_a\theta_a S_{\frac{n_k}{\sigma}b,\psi_k}.$$

$$(7\,b)\qquad P_k[n_k\sinh(n_k a-\gamma_k)+\nu'_a\cosh(n_k a-\gamma_k)]=\nu'_a\theta'_a S_{\frac{n_k}{\sigma}b,\psi_k},$$

$$(8\,a)\qquad Q_i\left[\frac{m_i}{\sigma}\sinh\left(\frac{m_i}{\sigma}b+\delta_i\right)+\nu_b\cosh\left(\frac{m_i}{\sigma}b+\delta_i\right)\right]=\nu_b\theta_b S_{m_i a,\varphi_i}.$$

$$(8\,b)\qquad Q_i\left[\frac{m_i}{\sigma}\sinh\left(\frac{m_i}{\sigma}b-\delta_i\right)+\nu'_b\cosh\left(\frac{m_i}{\sigma}b-\delta_i\right)\right]=\nu'_b\theta'_b S_{m_i a,\varphi_i}.$$

ce qui donne les deux relations suivantes, permettant de calculer les angles inconnus γ_k et δ_i, en divisant (7 *a*) par (7 *b*) et (8 *a*) par (8 *b*)

$$(9)\qquad \frac{n_k\sinh(n_k a+\gamma_k)+\nu_a\cosh(n_k a+\gamma_k)}{n_k\sinh(n_k a-\gamma_k)+\nu'_a\cosh(n_k a-\gamma_k)}=\frac{\nu_a\theta_a}{\nu'_a\theta'_a},$$

et

$$(10)\qquad \frac{\frac{m_i}{\sigma}\sinh\left(\frac{m_i}{\sigma}b+\delta_i\right)+\nu_b\cosh\left(\frac{m_i}{\sigma}b+\delta_i\right)}{\frac{m_i}{\sigma}\sinh\left(\frac{m_i}{\sigma}b-\delta_i\right)+\nu'_b\cosh\left(\frac{m_i}{\sigma}b-\delta_i\right)}=\frac{\nu_b\theta_b}{\nu'_b\theta'_b}.$$

Les valeurs de P_k et de Q_i se déduisent alors d'une des relations (7) et (8).

Ce cas général ne se rencontre pas en pratique; toutefois lorsqu'une bobine inductrice comporte un évent, l'air passant dans cet évent s'échauffe et il ne serait pas correct d'admettre que la température de l'air circulant dans l'évent a la valeur de celle de l'air entourant la machine. Dans ce cas pratique on peut admettre que la température de l'air ambiant a la même valeur sur les trois autres faces de la bobine.

Si nous posons égale à zéro la température commune $\theta_b=\theta'_b=\theta'_a$, θ_a est exprimée en surélévation de température par rapport à cette dernière; il en est de même pour θ en un endroit quelconque de la bobine.

Dans ce cas particulier les formules précédentes se simplifient; on a $Q_i=0$ en vertu de (6) et de (8) et la relation

$$n_k\,\mathrm{tgh}\,(n_k a-\gamma_k)=-\nu'_a\ .$$

tirée de (7 *b*) donne directement γ_k.

Digitized by Google

Des formules (2), (3), (4) et (7 *a*) on tire les autres constantes du problème entrant dans l'expression de la température, qui est donnée maintenant par :

$$\theta = \theta_b + \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty} A_{i,k} \cos(m_i x + \varphi_i) \cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right) + \sum_{k=1}^{\infty} P_k \cosh(n_k x + \gamma_k) \cos\left(\frac{n_k}{\sigma} y + \psi_k\right).$$

Nous ne déterminons pas ici l'influence de la variation de la résistance, due à l'échauffement, recherche qui amène à des résultats très compliqués.

Conclusion.

Beaucoup de problèmes concernant l'échauffement des machines électriques peuvent être ramenés à des problèmes à deux dimensions, mais nous devons nous arrêter ici, en réservant la suite du présent travail à une étude ultérieure.

Celle-ci devra donner encore d'autres exemples pratiques à deux dimensions, et devra montrer l'application générale de la série convergente double

$$\theta = \Sigma A \cos mx \cos nx$$

même à des cas où la répartition des sources de chaleur est discontinue.

L'étude ultérieure devra s'étendre de plus aux problèmes à trois dimensions, pour lesquels on peut prévoir la solution

$$\theta = \Sigma A \cos mx \cos ny \cos pz$$

et elle devra enfin s'occuper de la question dans toute sa généralité, qui amènera, de par la forme des machines électriques, à des fonctions cylindriques.

Digitized by Google

Digitized by Google

TABLE DONNANT LES VALEURS DES FONCTIONS

$$S_{u_i} = \frac{4 \sin u_i}{2u_i + \sin 2u_i} = \frac{4 \sin [(i-1)\pi + \mu_i]}{2[(i-1\,\pi + \mu_i] + \sin 2[(i-1)\pi + \mu_i]}$$

$$= (-1)^{i+1} \frac{4 \sin \mu_i}{2\mu_i + 2(i-1)\pi + \sin 2\mu_i},$$

EN FONCTION DES EXCÉDENTS μ_i

Pour l'application de cette table, il y a lieu de se reporter aux instructions données à la fin du paragraphe 12.

Dans ces tables, la cinquième décimale est garantie exacte à une unité près.

Digitized by Google

μ	S_{u1} 1er quadrt	S_{u2} 3e quadrt	S_{u3} 5e quadrt	S_{u4} 7e quadrt	S_{u5} 9e quadrt	S_{u6} 11e quadrt
0.00	+1.00000	−0.00000	+0 00000	−0.00000	+0.00000	− 0.00000
0.01	1.00002	0.00633	0.00317	0.00212	0.00159	0.00127
0.02	1.00007	0.01257	0.00633	0.00423	0.00317	0.00254
0.03	1.00015	0.01874	0.00946	0.00632	0.00475	0.00380
0.04	1.00027	0.02483	0.01257	0.00841	0.00632	0.00507
0.05	1.00042	0.03084	0.01566	0.01049	0.00789	0.00632
0.06	1.00060	0.03677	0.01873	0.01256	0.00945	0.00758
0.07	1.00082	0.04263	0.02178	0.01463	0.01101	0.00883
0.08	1.00107	0.04841	0.02481	0.01668	0.01256	0.01007
0.09	1.00135	0.05413	0.02781	0.01872	0.01410	0.01131
0.10	1.00167	0.05976	0.03080	0.02075	0.01564	0.01255
0.11	1.00202	0.06533	0.03377	0.02277	0.01717	0.01379
0.12	1.00240	0.07083	0.03671	0.02478	0.01870	0.01501
0.13	1.00282	0.07625	0.03963	0.02677	0.02022	0.01624
0.14	1.00327	0.08161	0.04253	0.02876	0.02173	0.01746
0.15	1.00375	0.08690	0.04542	0.03074	0.02323	0.01867
0.16	1.00426	0.09212	0.04827	0.03271	0.02473	0.01988
0.17	1.00481	0.09728	0.05111	0.03466	0.02622	0.02109
0.18	1.00540	0.10237	0.05393	0.03661	0.02771	0.02229
0.19	1.00601	0.10740	0.05673	0.03854	0.02919	0.02348
0.20	1.00666	0.11236	0.05950	0.04046	0.03066	0.02468
0.21	1.00734	0.11726	0.06225	0.04238	0.03212	0.02586
0.22	1.00806	0.12210	0.06499	0.04428	0.03358	0.02704
0.23	1.00881	0.12688	0.06770	0.04616	0.03502	0.02822
0.24	1.00959	0.13160	0.07039	0.04804	0.03647	0.02938
0.25	1.01040	0.13626	0.07306	0.04991	0.03790	0.03055
0.26	1.01125	0.14086	0.07571	0.05176	0.03932	0.03171
0.27	1.01213	0.14541	0.07833	0.05360	0.04074	0.03286
0.28	1.01305	0.14990	0.08094	0.05544	0.04215	0.03401
0.29	1.01399	0.15433	0.08352	0.05725	0.04356	0.03515
0.30	1.01497	0.15871	0.08609	0.05906	0.04495	0.03628
0.31	1.01599	0.16304	0.08863	0.06086	0.04634	0.03741
0.32	1.01703	0.16732	0.09116	0.06264	0.04772	0.03853
0.33	1.01811	0.17154	0.09366	0.06441	0.04909	0.03965
0.34	1.01922	0.17571	0.09614	0.06617	0.05045	0.04076
0.35	1.02036	0.17982	0.09860	0.06792	0.05180	0.04187
0.36	1.02154	0.18389	0.10104	0.06966	0.05315	0.04297
0.37	1.02275	0.18791	0.10346	0.07138	0.05449	0.04406
0.38	1.02399	0.19189	0.10586	0.07309	0.05582	0.04514
0.39	1.02526	0.19581	0.10824	0.07479	0.05714	0.04622
0.40	1.02657	0.19969	0.11060	0.07648	0.05845	0.04730
0.41	1.02791	0.20352	0.11294	0.07816	0.05975	0.04836

Digitized by Google

μ	S_{u1} 1er quadr^{t}	S_{u2} 3^{e} quadr^{t}	S_{u3} 5^{e} quadr^{t}	S_{u4} 7^{e} quadr^{t}	S_{u5} 9^{e} quadr^{t}	S_{u6} 11^{e} quadr^{t}
0.42	+1.02928	−0.20731	+0.11526	−0.07982	+0.06105	− 0 04942
0.43	1.03068	0.21105	0.11756	0.08147	0.06233	0.05048
0.44	1.03212	0.21474	0.11984	0.08311	0.06361	0.05152
0.45	1.03359	0.21840	0.12210	0.08474	0.06488	0.05256
0.46	1.03508	0.22201	0.12434	0.08635	0.06614	0.05360
0.47	1.03661	0.22558	0.12656	0.08795	0.06739	0.05462
0.48	1.03818	0.22910	0.12876	0.08954	0.06864	0.05564
0.49	1.03977	0.23259	0.13094	0.09112	0.06987	0.05666
0.50	1.04140	0.23603	0.13310	0.09268	0.07109	0.05766
0.51	1.04305	0.23944	0.13524	0.09424	0.07231	0.05866
0.52	1.04474	0.24281	0.13737	0.09578	0.07352	0.05965
0.53	1.04646	0.24614	0.13947	0.09730	0.07471	0.06064
0.54	1.04821	0.24942	0.14155	0.09882	0.07590	0.06161
0.55	1.04999	0.25268	0.14362	0.10032	0.07708	0.06258
0.56	1.05180	0.25589	0.14567	0.10181	0.07825	0.06355
0.57	1.05364	0.25907	0.14769	0.10329	0.07941	0.06450
0.58	1.05551	0.26221	0.14970	0.10475	0.08056	0.06545
0.59	1.05741	0.26532	0.15169	0.10621	0.08171	0.06639
0.60	1.05935	0.26839	0.15366	0.10765	0.08284	0.06732
0.61	1.06131	0.27143	0.15561	0.10907	0.08396	0.06825
0.62	1.06330	0.27443	0.15755	0.11049	0.08508	0.06917
0.63	1.06532	0.27740	0.15946	0.11189	0.08618	0.07008
0.64	1.06736	0.28033	0.16136	0.11328	0.08727	0.07098
0.65	1.06944	0.28324	0.16323	0.11466	0.08836	0.07188
0.66	1.07155	0.28611	0.16509	0.11602	0.08944	0.07276
0.67	1.07368	0.28894	0.16693	0.11737	0.09050	0.07364
0.68	1.07584	0.29175	0.16876	0.11871	0.09156	0.07452
0.69	1.07803	0.29452	0.17056	0.12004	0.09261	0.07538
0.70	1.08025	0.29726	0.17234	0.12135	0.09364	0.07624
0.71	1.08249	0.29998	0.17411	0.12265	0.09467	0.07708
0.72	1.08476	0.30266	0.17586	0.12394	0.09569	0.07792
0.73	1.08705	0.30531	0.17759	0.12521	0.09669	0.07876
0.74	1.08937	0.30793	0.17931	0.12648	0.09769	0.07958
0.75	1.09172	0.31052	0.18100	0.12773	0.09868	0.08040
0.76	1.09409	0.31308	0.18268	0.12896	0.09966	0.08121
0.77	1.09648	0.31561	0.18433	0.13019	0.10063	0.08201
0.78	1.09890	0.31811	0.18597	0.13139	0.10158	0.08280
0.79	1.10134	0.32059	0.18759	0.13259	0.10253	0.08358
0.80	1.10381	0.32303	0.18920	0.13377	0.10347	0.08436
0.81	1.10629	0.32545	0.19079	0.13494	0.10440	0.08512
0.82	1.10880	0.32784	0.19236	0.13610	0.10531	0.08588
0.83	1.11133	0.33020	0.19391	0.13725	0.10622	0.08663
0.84	1.11388	0.33253	0.19544	0.13839	0.10712	0.08737

Digitized by Google

μ	S_{u1} 1er quadrt	S_{u2} 3e quadrt	S_{u3} 5e quadrt	S_{u4} 7e quadrt	S_{u5} 9e quadrt	S_{u6} 11e quadr
0.85	+1.11646	− 0.33484	+0 19695	−0.13951	+0.10801	− 0 08811
0.86	1.11905	0.33712	0.19845	0.14061	0.10888	0.08883
0.87	1.12166	0.33937	0.19993	0.14170	0.10975	0.08955
0.88	1.12428	0.34159	0.20139	0.14278	0.11060	0.09026
0.89	1.12693	0.34378	0.20283	0.14385	0.11145	0.09095
0.90	1.12959	0.34595	0.20425	0.14490	0.11228	0.09164
0.91	1.13227	0.34810	0.20566	0.14594	0.11310	0.09233
0.92	1.13496	0.35021	0 20705	0.14697	0.11391	0.09300
0.93	1.13766	0.35230	0.20842	0.14798	0.11472	0.09366
0.94	1.14039	0.35436	0.20977	0.14898	0.11551	0.09432
0.95	1.14312	0.35639	0.21110	0.14997	0.11629	0.09496
0.96	1.14586	0.35840	0.21242	0.15094	0.11706	0.09560
0.97	1.14861	0.36038	0.21371	0.15190	0.11782	0.09623
0.98	1.15138	0.36233	0.21499	0.15284	0.11857	0.09685
0.99	1.15415	0.36426	0.21625	0.15377	0.11930	0.09746
1.00	1.15694	0.36616	0.21750	0.15469	0.12003	0.09806
1.01	1.15973	0.36803	0.21872	0.15559	0.12075	0.09865
1.02	1.16252	0.36987	0.21992	0.15648	0.12145	0.09923
1.03	1.16532	0.37169	0.22111	0.15736	0.12214	0.09981
1.04	1.16812	0.37348	0.22228	0.15822	0.12282	0.10037
1.05	1.17092	0.37525	0.22343	0.15907	0.12349	0.10092
1.06	1.17373	0.37698	0.22455	0.15990	0.12415	0.10147
1.07	1.17653	0.37869	0.22567	0.16072	0.12480	0.10201
1.08	1.17933	0.38038	0.22676	0.16152	0.12544	0.10253
1.09	1.18213	0.38203	0.22783	0.16231	0.12606	0.10305
1.10	1.18492	0.38366	0.22888	0.16309	0.12668	0.10356
1.11	1.18770	0.38526	0.22992	0.16385	0.12728	0.10405
1.12	1.19047	0.38683	0.23093	0.16460	0.12787	0.10454
1.13	1.19325	0.38837	0.23193	0.16533	0.12845	0.10502
1.14	1.19601	0.38988	0.23290	0.16605	0.12901	0.10549
1.15	1.19876	0.39137	0.23386	0.16675	0.12957	0.10595
1.16	1.20149	0.39283	0.23480	0.16744	0.13011	0.10639
1.17	1.20421	0.39426	0.23571	0.16811	0.13064	0.10683
1.18	1.20690	0.39565	0.23661	0.16877	0.13116	0.10726
1.19	1.20957	0.39702	0.23749	0.16941	0.13167	0.10768
1.20	1.21223	0.39836	0.23835	0.17004	0.13217	0.10809
1.21	1.21485	0.39968	0.23918	0.17065	0.13265	0.10849
1.22	1.21746	0.40096	0.24000	0.17125	0.13312	0.10888
1.23	1.22004	0.40221	0.24079	0.17183	0.13358	0.10926
1.24	1.22258	0.40342	0.24157	0.17240	0.13402	0.10962
1.25	1.22510	0.40461	0.24232	0.17295	0.13446	0.10998
1.26	1.22758	0.40577	0.24306	0.17349	0.13488	0.11033
1.27	1.23003	0.40690	0.24377	0.17401	0.13529	0.11067

Digitized by Google

μ	S_{u1} 1er quadrt	S_{u2} 3e quadrt	S_{u3} 5e quadrt	S_{u4} 7e quadrt	S_{u5} 9e quadrt	S_{u6} 11e quadrt
1 28	+ 1.23243	− 0.40799	+ 0 24446	− 0 17451	+ 0 13569	− 0.11099
1.29	1.23480	0.40905	0.24513	0.17500	0.13607	0.11131
1.30	1.23711	0.41008	0.24578	0.17547	0.13644	0.11162
1.31	1.23939	0.41108	0.24640	0.17593	0.13680	0.11191
1.32	1.24161	0.41205	0.24701	0.17637	0.13715	0.11220
1.33	1.24379	0.41298	0.24759	0.17680	0.13748	0.11247
1.34	1.24591	0.41387	0.24815	0.17720	0.13780	0.11273
1.35	1.24798	0.41474	0.24869	0.17759	0.13811	0.11299
1.36	1.24999	0.41556	0.24921	0.17797	0.13840	0.11323
1.37	1.25193	0.41636	0.24970	0.17832	0.13868	0.11346
1.38	1.25381	0.41712	0.25017	0.17866	0.13895	0.11368
1.39	1.25562	0.41784	0.25062	0.17899	0.13920	0.11389
1.40	1.25736	0.41853	0.25105	0.17930	0.13945	0.11409
1.41	1.25902	0.41918	0.25145	0.17959	0.13967	0.11427
1.42	1.26061	0.41980	0.25183	0.17986	0.13989	0.11445
1.43	1.26212	0.42038	0.25219	0.18012	0.14009	0.11462
1.44	1.26356	0.42092	0.25252	0.18036	0.14028	0.11477
1.45	1.26490	0.42143	0.25283	0.18059	0.14045	0.11491
1.46	1.26616	0.42189	0.25312	0.18079	0.14061	0.11505
1.47	1.26733	0.42232	0.25338	0.18098	0.14076	0.11517
1.48	1.26840	0.42271	0.25362	0.18115	0.14089	0.11528
1.49	1.26937	0.42306	0.25383	0.18130	0.14101	0.11537
1.50	1.27024	0.42337	0.25402	0.18144	0.14112	0.11546
1.51	1.27101	0.42364	0.25418	0.18156	0.14121	0.11554
1.52	1.27167	0.42387	0.25432	0.18166	0.14129	0.11560
1.53	1.27222	0.42406	0.25444	0.18174	0.14135	0.11565
1.54	1.27265	0.42421	0.25453	0.18181	0.14140	0.11569
1.55	1.27297	0.42432	0.25459	0.18185	0.14144	0.11572
1.56	1.27317	0.42439	0.25463	0.18188	0.14146	0.11574
1.57	1.27324	0.42441	0.25465	0.18189	0.14147	0.11575

Digitized by Google

VI. — BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages sur la théorie analytique de la chaleur.

M. Fourier : *Théorie analytique de la chaleur* (1822) (Gauthier-Villars, 1888).

Poisson : *Théorie mathématique de la chaleur* (1835-1837) (Gauthier-Villars).

G. Lamé : *Leçons sur les fonctions inverses des transcendantes et les surfaces isothermes* (1857) (Mallet-Bachelier).

G. Lamé : *Leçons sur la théorie analytique de la chaleur* (1861) (Gauthier-Villars).

H. Poincaré : *Théorie analytique de propagation de la chaleur* (1893-1894) (Gauthier-Villars).

M.-H. Resal : *Traité de Physique mathématique*. T. I (1887) ; T. II (1888) (Gauthier-Villars).

Boussinesq : *Théorie analytique de la chaleur*. T. I (1901) ; T. II (1903) ; T. III (1921) (Gauthier-Villars).

H. Gröber : *Die Grundgestze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges* (Editeur Julius Springer, Berlin, 1921).

Ouvrages électrotechniques traitant des questions d'échauffement.

L. Binder : *Uber Wärmeübergang auf ruhige oder bewegte Luft sowie Lüftung und Kühlung elektrischer Maschinen* (Editeur Wilhelm Knapp, Halle a. S., 1911).

Miles Walker : *Specification and Design of Dynamo-Electric Machinery* (Langmans, Green and Co, London, 1918).

Milan Vidmar : *Die Transformatoren* (Editeur Julius Springer, Berlin, 1921).

The british engineering standards committee : *Report on the effect of temperature on insulating materials* (Grosby Lockwood and Sons, London, 1905).

Articles parus dans les Revues périodiques.

I. — Généralités sur l'échauffement.

C. Decharme : *Comparaison entre le mode de propagation de l'électricité et celui de la chaleur* (L. E. I. T. XIII, p. 241. 16/VIII-1884).

R. Goldschmidt : *Die Grundgesetze der Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XXIX, pp. 886, 912, 935. 10/IX-24/IX-1908).

W. S. Hadaway : *Electric heating* (P. A. I. E. E. T. XXVIII, p. 157. 12/XI-1908).

A. E. Kennelly, C. A. Wright, J. S. Van Bylevelt : *The Convection of heat from small copper wires* (P. A. I. E. E. T. XXVIII, p. 699. 28/VI-1909).

L. Roy : *De l'influence de la ventilation sur la température de régime des conducteurs nus ou isolés* (B. S. I. E. T. X (2e), p. 69. 2/II-1910).

C. Hering : *Simplification of electro-thermal calculations ; the watt and thermal ohm* (P. A. I. E. E. T. XXXI, p. 885 (2157). 25/VI-1912).

I. Langmuir : *The convection and conduction of heat in gases* (P. A. I. E. E. T. XXXI, p. 1011. 25/VI-1912).

J. J. Frank and W. O. Dwyer : *The temperature rise of stationary induction apparatus as influenced by the effects of temperature, barometric pressure and humidity of the cooling medium* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 339. 26/II-1913).

Digitized by Google

I. LANGMUIR : *Laws of heat transmission in electrical machinery* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 389. 26/II-1913).

C. R. BLANCHARD AND C. T. ANDERSON : *A laboratory investigation of temperature rise as a function of atmospheric condition* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 463, 26/II-1913).

C. E. SKINNER, L. W. CHUBB, PH. THOMAS : *Effect of air temperature, barometric pressure and humidity on the temperature rise of electric apparatus* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 553, 26/II-1913).

L. BINDER : *Über die Berechnung der Temperaturen im Innern von Magnetspulen* (A. f. E. T. II, p. 131. IV-1913).

B. G. LAMME : *Temperature distributions in electrical machinery* (P. A. I. E. E. T. XXXV, p. 1579. 6/X-1916) (The El. J. T. XIV, p. 42, II-1917).

J. FISCHER-HINNEN : *Die Erwärmung von Maschinen und Transformatoren* (E. u. M. T. XXXVI, pp. 205, 217. 5-12/V-1918).

CH. VALET : *Sur un moyen de forcer la puissance d'un générateur électrique* (I. E. T. XXVII, pp. 187, 265. 25/V, 25/VII-1918).

C. J. FECHHEIMER : *Heat Flow in Armature Coils* (E. W. T. 80, p. 1145. 25/XI-1922).

G. SEMENZA : *The relation of overload to the inner temperature of machines* (J. A. I. E. E. T. XLI, p. 1031. XII-1922).

AN : *The laws of heat transfer* (Eng. T. CXVI, pp. 1, 69, 131, 228. 6/VII-24/VIII-1923).

CH. W. RICE : *Free and forced convection of heat in gases and liquids* (J.A.I.E.E. T. XLII, p. 1288. XII-1923).

L. DREYFUS : *Mathematische Theorien für den Durchschlag fester Isoliermaterialen* (B. A. S. E. T. XV, pp. 321, 577. VII-XII-1924).

V. M. MONTSINGER AND W. H. COONEY : *Temperature rise of stationary electrical apparatus as influenced by radiation, convection and altitude* (J. A. I. E. E. T. XLIII, p. 803. IX-1924).

G. H. PERRIN : *Etude théorique et pratique de la convection calorifique* (R. G. E. T. XVII, p. 3. 3/I-1925).

H. GRÖBER : *Die Erwärmung und Abkühlung einfacher geometrischer Körper* (Z. d. V. D. I. T. 69, p. 705. 23/V-1925).

C. J. FECHHEIMER : *The rating of electrical machines as affected by altitude* (J. A. I. E. E. T. XLV, p. 124 (763). II-1926).

M. DEVAUCHELLE : *Transmission et déperdition de la chaleur* (Electricien : T. XLII, p. 141. 15/III-1926).

O. GRAMISCH : *Ermittlung genauer Erwärmungs-und Abkühlungslinien* (E. u. M. T. 44, p. 776. 17/X-1926).

II. — ETUDE ANALYTIQUE DE L'ÉCHAUFFEMENT. RÉGIME STATIONNAIRE.

F. EMDE : *Die Erwärmung eines drahtförmigen Schmelzeinsatzes* (E. u. M. T. XXV, pp. 455, 478. 16-23/VI-1907).

L. ROY : *Recherches théoriques et expérimentales sur l'échauffement des conducteurs par le courant* (L. E. I. T. III, pp. 99, 134, 163. 25/VII-8/VIII-1908).

K. KOHLER : *Über die Verteilung und Leitung der Wärme in einer kreisringförmigen Platte* (E. u. M. T. XXVI, p. 903. 18/X-1908).

F. EMDE : *Die Verteilung der Beharrungstemperatur in einer kreisringförmigen Platte* (E. u. M. T. XXVII, p. 175. 21/II-1909).

E. ARNOLD : *Die Erwärmung der Wicklungen bei Dynamomaschinen von grossen Eisenlänge* (E. T. Z. T. XXX, p. 172. 25/II-1909).

Digitized by Google

G. Ossanna : *Uber die radiale Kühlung von Dynamoankern* (E. u. M. T. XXVII, p. 489. 23/V-1909).

K. Humburg : *Die Temperaturverteilung im Innern von Magnetspulen mit rechteckigem Querschnitt* (E. u. M. T. XXVII, pp. 677, 696. 18-25/VII-1909).

A. Lang : *Die Erwärmung der Wicklungen elektrischer Maschinen aus Ersatzmetallen* (E. u. M. T. XXXV, pp. 201, 232. 29/IV-13/V-1917).

G. H. Perrin : *Note sur l'échauffement des conducteurs dans les encoches* (R. G. E. T. III, p. 643. 4/V-1918).

W. Rogowski : *Ergänzung der Erwärmungsvorschriften* (A. f. E. T. VII, p. 41 13/IX-1918).

M. Jakob : *Die Temperaturverteilung in einer elektrischen Wicklung von rechteckigem Querschnitt* (A. f. E. T. VIII, p. 117. 28/VIII-1919).

M. Baringolz : *Echauffement des alternateurs et des moteurs asynchrones* (I. E. T. XXVIII, pp. 436, 451, 467. 25/XI, 25/XII-1909).

C. J. Fechheimer : *Longitudinal and traverse heat flow in slotwound armature coils* (J. A. I. E. E. I. XL, pp. 244, 332, 421. III-V-1921).

O. Böhm : *Uber die Erwärmung von Ankerspulen bei gleichmässig verteilten Luftschlitzen im Eisen* (E. T. Z. T. XLII, p. 1388, 1/XII-1921).

O. Böhm : *Vorausberechnung der Erwarmung elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XLIII, p. 810, 15/VI-1922).

W. Peters : *Die Temperaturverteilung in den Nuten von Zweistabwicklungen* (Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern, 1925).

S. Hjertén : *Die Erwärmung der Ständerwicklungen in einer Gleichstrommaschine* (E. T. Z. T. 48, p. 793. 9/VI-1927).

III. — Etude analytique de l'échauffement. Régime transitoire et intermittent.

E. Oelschlager : *Die Berechnung von Widerstanden, Motoren und dergleichen für aussetzende Betriebe* (E. T. Z. T. XXI, p. 1058. 20/XII-1900).

F. Kade : *Verfahren zur Feststellung der endgültigen Erwärmung eines intermittierend belasteten elektrischen Apparates* (E. T. Z. T. XXVI, p. 346 13/IV-1905).

A. Press : *Dynamo heating time constants* (E. W. T. XLVI, p. 735, 28/X-1905).

M. Gacogne : *Calcul de l'élévation de température des conducteurs électriques* (L. E. I. T. I, p. 363. 21/III-1908).

L. Roy : *Recherches théoriques et expérimentales sur l'échauffement des conducteurs par le courant* (L. E. I. T. III, pp. 99, 134, 163. 25/VII-8/VIII-1908).

G. Benischke : *Die Ermittelung der Zeitkonstante und der stationären Temperatur elektrischer Maschinen* (E. u. M. T. XXVII, p. 27. 10/I-1909).

C. Richter : *Die Ermittlung der Übertemperaturen elektrischer Widerstände bei veränderlicher Strombelastung* (E. u. M. T. XXVII, p. 269. 21/III-1909).

O. Szilas : *Graphische Untersuchung des Erwärmungsproblems von elektrischen Maschinen und Transformatoren* (E. u. M. T. XXXI, pp. 1065, 1095. 7-14/XII-1913).

L. Isambert : *Température des machines électriques destinées à un service intermittent* (L. E. I. T. XXV, p. 133. 31/I-1914).

A. Müller : *Erwärmungskurven elektrischer Maschinen* (E. u. M. T. XXXIII, p. 21. 10/I-1915).

M. d'Aste : *Note sur l'échauffement des appareils électriques en service courant* (L. E. I. T. XXXII, p. 169. 19/II-1916).

L. Binder : *Kurzschlusserwärmung in Kraftwerken und Überlandnetzen* (E. T. Z. T. XXXVII, pp. 589, 606. 2-9/XI-1916).

Digitized by Google

A. Lang : *Die Erwärmung der Wicklungen elektrischer Maschinen aus Ersatzmetallen* (E. u. M. T. XXXV, pp. 201, 232. 29/IV, 13/V-1917).

H. H. Broughton : *Note on the rating of intermittent motors of large output* (The Electrician, T. 79, p. 187. 4/V-1917).

G. Gut : *Ein neues graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung elektrischer Maschinen und Apparate für intermittierende Betriebe, einschliesslich Bahnen* (B. A. S. E. T. IX, p. 35. 13/II-1918).

R. E. Hellmund : *Temperature rise with short-time loads* (E. W. T. 77, p. 707. 26/III-1921).

F. Blanc : *Dauerleistung, Zeitleistung, Aussetzleistung* (E. T. Z. T. XLIII, pp. 173, 216. 9-16/II-1922).

U. Knorr : *Beitrag zur graphischen Behandlung von Erwärmungsvorgängen* (E. T. Z. T. XLIII, p. 1032. 11/VII-1922).

J. Hak : *Zur Bestimmung der Koeffizienten von Erwärmungs-und Abkühlungskurven* (E. u. M. T. XL, p. 545. 19/XI-1922).

R. Richter : *Die Erwärmungskurve bei zeitlich linearer Belastung und ihre Anwendung auf beliebige Belastungskurven* (E. I. Z. T. XLIV, p. 449. 17/V-1923).

P. Girault : *Sur l'échauffement d'un organe de machine électrique soumis à des pertes dans le fer constantes et à des pertes par effet Joule* (R. G. E. T. XIV, pp. 115, 147. 28/VII, 4/VIII-1923).

J. Hak : *Eine graphische Methode zur Lösung von Erwärmungsaufgaben* (E. T. Z. T. XLV, p. 235. 20/III-1924).

F. Ratkovszky : *Die Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XLV, p. 527. 22/V-1924).

K. Grütter : *Die Berechnung fester Wärmespeicher* (B. A. S. E. T. XV, p. 493. X-1924).

Schwerdt : *Fluchtlinientafel für die Erwärmungsfunktion* (E. T. Z. T. XLV, p. 1435. 25/XII-1924).

V. Karapetoff : *Parameters of heating curves of electrical machinery* (J.A.I.E.E. T. XLV, p. 40 (681)-I-1926).

B. Gerstmann : *Zur Erwärmung ungleichmässig belasteter elektrischer Maschinen* (E. u. M. T. XLIV, p. 629. 29/VIII-1926).

M. Liwschitz : *Berechnung der Aussetzleistung von geschlossenen Drehstrommotoren* (E. T. Z. T. 47, p. 1345. 18/XI-1926).

H. Ott : *Kritische Bemerkungen zur Erwärmungsgleichung unter Berücksichtigung des Temperaturabhängigkeit von Wärmeabgabe und specifischem Widerstand sowie des Inhomogenität des Körpers* (E. u. M. T. 45, p. 317. 17/IV-1927).

S. Whitehead : *Determining temperature distribution* (The Electrician, T. 99, p. 225. 19/VIII-1927).

IV. — Etudes expérimentales de l'échauffement. Régime stationnaire.

S. S. Neu, A. J. Levine, O. A. Havill : *The heating of magnet coils* (E. W. T. 38, p. 38, p. 56, 13/VII-1901).

E. H. Rayner : *Report on temperature experiments on field coils of electrical machines at the National Physical Laboratory* (I. E. E. T. 34, p. 613. 1905).

F. H. Rayner : *Investigation on the temperature of fields coils* (The Electrician, T. 72, p. 702. 30/I-1914).

M. Maclean, D. J. Mackellar, R. S. Begg : *Distribution de la température dans*

Digitized by Google

les bobines d'inducteurs (R. E. T. XXIII, p. 362. 7/V-1915) (I. E. E. T. 53, p. 526. 1/IV-1915).

R. Kelly : *Internal temperatures of A. C. generators* (P. A. I. E. E. T. XXXVI, p. 103. 14/II-1917).

W. Rogowski und V. Vieweg : *Die Höchsttemperatur stromdurchflossener Spulen* (A. f. E. T. VIII, p. 329. 8/XII-1919).

O. Böhm : *Vorausberechnung der Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XLIII, p. 810. 15/VI-1922).

E. Hughes : *The rise and distribution of temperature in small electrical machines* (I. E. E. T. 62, p. 628. VII-1924).

V. — Etudes expérimentales de l'échauffement. Régime transitoire et intermittent.

C. Decharme : *Comparaison entre le mode de propagation de l'électricité et celui de la chaleur* (L. E. I. T. XIII, p. 241. 16/VIII-1884).

S. S. Neu, A. J. Levine, O. A. Havill : *The heating of magnet coils* (E. W. T. 38, p. 56. 13/VII-1901).

R. Goldschmidt : *Sur l'échauffement des machines électriques* (E. E. T. XLV, p. 469. 23/II-1905) (I. E. E. T. XXXIV, p. 660. V-1905).

J. T. Morris, J. W. Elliott, D. Lewes : *Heat tests of alternate-current transformer* (The Electrician. T. 68, p. 638. 26/I-1912).

W. R. Cooper : *Short heat tests of electrical machines* (The Electrician. T. 71, p. 972. 19/IX-1913).

H. Lubowsky : *Höchsttemperatur an Wicklungen* (E. T. Z. T. XLI, p. 646. 19/IX-1920).

M. Jakob : *Uber die Bestimmung der Höchsttemperatur stark isolierter Spulen* (A. f. E. T. X, p. 47. 10/VI-1921).

G. E. Luke : *Heating of railway motors in service and on test-floor runs* (J. A. I. E. E. T. XLI, p. 165. III-1922).

G. E. Luke : *Temperature rise of electric machines on intermittent duty* (E. W. T. 79, p. 1069. 27/V-1922).

E. Hughes : *The rise and distribution of temperature in small electrical machines* (I. E. E. T. 62, p. 628. VII-1924).

A. E. Kennelly : *The thermal time constants of dynamo-electric machinery* (J. A. I. E. E. T. XLIV, p. 142. II-1925).

W. H. Cooney : *Predetermination of self-cooled oil-immersed transformer temperatures before conditions are constant* (J. A. I. E. E. T. XLIV, p. 1324. XII-1925).

A. E. Kennelly : *Can the thermal capacity of electric machines be made a simple and practical element of rating?* (J. A. I. E. E. T. XLV, p. 438. V-1926).

G. C. Heckmann : *Heating a large generator rotor by induction* (The El. J. T. XXIII, p. 467. IX-1926).

VI. — Détermination de la conductibilité thermique intérieure (K).

H. F. Weber : *Rapport entre les coefficients de conductibilités électrique et thermique des métaux* (L. E. I. T. V, p. 307. 30/XI-1881).

A. Berget : *Sur le rapport entre les conductibilités électrique et thermique des métaux* (L. E. I. T. XXXV, p. 240. 1/II-1890). (L. E. I. T. XXXVI, p. 605. 28/VI-1890).

Digitized by Google

E. Van Aubel et S. Paillot : *Relation entre les conductibilités électrique et thermique des alliages* (E. E. T. V, p. 379. 23/XI-1895).

F. A. Schulze : *Le fer et la loi de Wiedeman et Franz* (E. E. T. XV, p. 35. 2/IV-1898).

L. Ott : *Untersuchungen zur Frage der Erwärmung elektrischer Maschinen* (Z. d. V. D. I. T. LI, p. 1145. 20/VII-1907) (Mitt. über Forschungsarbeiten-Heft 35-36-1906).

Th. M. Barlow : *Heat conductivity of Iron Stampings* (I. E. E. T. XL, p. 601. 15/I-1908) (L. E. H. T. I, p. 278. 29/II-1908).

G. Schmaltz : *Zur Frage der Erwärmung der Anker elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XXIX, p. 188. 27/II-1908).

R. Goldschmidt : *Die Grundgesetze der Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XXIX, pp. 886, 912, 935. 10-24/IX-1908).

H. Gröber : *Wärmeleitfähigkeit von Isolier-und, Baustoffen* (Z. d. V. d. I. T. LIV, p. 1319. 6/VIII-1910).

H. D. Symons and M. Walker : *The heat paths in electrical machinery* (The Electrician. T. LXVIII, p. 622. 26/I-1912).

F. Niethammer : *Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. K. F. B. T. X, p. 130. 4/III-1912).

I. Langmuir : *Laws of heat transmission in electrical machinery* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 389. 26/II-1913).

R. B. Williamson : *Notes on internal heating of stator coils* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 437. 26/II-1913).

Max Jakob : *Über einige neuere praktische Verfahren zur Messung des Wärmeleitvermögens von Bau-und Isolierstoffen* (Z. d. V. D. I. T. LXIII, pp. 69, 118. 25/I, 8/II-1919).

T. S. Taylor : *The thermal conductivity of insulating and other materials* (The El. J. T. XVI, p. 526. XII-1919).

T. S. Taylor : *Reducing temperature of laminated cores* (E. W. T. LXXVI, p. 1159. 11/XII-1920).

R. Jouaust : *Etude sur la conductibilité calorifique des isolants industriels. Travaux du Lab. Cent. d'El.*) (B. S. F. E. T. I (4e), p. 67. 1921).

Paul Janet : *Recherches sur la conductibilité calorifique des gaines isolantes employées dans la construction des turbo-alternateurs* (R. G. E. T. IX, p. 393. 19/III-1921).

R Pohl : *Grundsätzliches zur Wärmeberechnung elektrischer Maschinen, insbesondere der im Kreisprozess gekühlten Turbogeneratoren* (A. f. E. T. XII. p. 361. 30/VI-1923).

P. Ehrmann : *Conductibilité calorifique des noyaux magnétiques feuilletés* (Communication faite à la S. F. E. le 2/II-1924) (B. S. F. E. T. V (4e), p. 247. 1925).

E. Hughes : *The rise and distribution of temperature in small electrical machines* (I. E. E. T. LXII, p. 628. VII-1924).

T. Spooner : *The properties and testing of magnetic materials XII : Alternating magnetizing current and mechanical and thermal properties of electrical sheet* (The El. J. T. XXIII, p. 106. III/1926).

R. Pohl : *Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit werkstattmässig hergestellter Isolierungen* (A. f. E. T. XVII, p. 473. 6/I-1927).

VII. — Détermination du coefficient d'émission de chaleur (h).

P. Cardani : *Sur la mesure des températures atteintes par des fils parcourus par des courants électriques et leur coefficient de conductibilité extérieure*

Digitized by Google

(L. E. I. T. XXXVIII, p. 627. 1890 ; T. XLII, p. 90. 1891 ; T. XLVI, p. 283. 1892).

L. Ott : *Untersuchungen zur Frage der Erwärmung elektrischer Maschinen* (Mitt. ü. Forchungsarbeiten H. 35-36. 1906) (Z. d. V. D. I. T. LI, p. 1145, 20/VII-1907).

G. A. Lister : *Heating coefficient of magnet coils* (I. E. E. T. XXXVIII, p. 339. 14/XII-1906).

R. Goldschmidt : *Die Grundgesetze der Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XXIX, pp. 886, 912, 935. 10-24/IX-1908).

W. Nusselt : *Der Wärmeübergang in Rohrleitungen* (Z. d. V. D. I. T. LIII, pp. 1750, 1808. 23/X-1909).

E. Hinlein : *Ein Beitrag zur Frage der Erwärmung der elektrischer Maschinen* (Z. d. V. D. I. T. LV, p. 730. 6/V-1911).

H. D. Symons and M. Walker : *The heat paths in electrical Machinery* (The Electrician. T. LXVIII, p. 622. 26/I-1912).

F. Niethammer : *Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. K. B. T. X, p. 130, 4/III-1912).

L. Binder : *Über die Berechnung der Temperaturen im Innern von Magnetspulen* (A. f. E. T. II, p. 131. IV-1913).

A. B. Eason : *Reduction in the temperature of a wire when covered with insulation* (The Electrician. LXXXV, p. 202. 20/VIII-1920).

K. Lubowsky : *Verfahren zur Bestimmung von Wärmeabgabekoeffizienten* (E. T. Z. T. XLII, p. 79. 27/I-1921).

R. Pohl : *Grundsätzliches zur Warmeberechnung elektrischer Maschinen, insbesondere der im Kreisprozess gekühlten Turbogeneratoren* (A. f. E. T. XII, p. 361. 30/VI-1923).

G. Luke : *The cooling of electric machines* (J. A. I. E. E. T. XLII, p. 1278. XII-1923).

E. Hughes : *The rise and distribution of temperature in small electrical machines* (I. E. E. T. LXII, p. 628. VII-1924).

G. Luke : *Surface heat transfer in electric machines with forced air flow* (J. A. I. E. E. T. XLV, p. 1070. XI-1926).

S. Hjertén : *Die Erwärmung der Ständerwicklungen in einer Gleichstrommaschine* (E. T. Z. T. XLVIII, p. 793. 9/VI-1927).

VIII. — Études sur le refroidissement et la ventilation.

R. Goldschmidt : *Die Grundgesetze der Erwärmung elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XXIX, pp. 886, 912, 935. 10/IX-24/IX-1908).

Th. Hoock : *Über die radiale Kühlung elektrischer Maschinen* (E. u. M. T. XXVIII, p. 908. 23/X-1910).

H. Kyser : *Wärmeentwicklung, Raumtemperatur, und Wärmebeseitigung in elektrischen Betriebsräumen* (E. K. B. T. IX, pp. 261, 321, 349, 371, 14/V-4/VII-1911).

K. Czeija : *Entwicklung der Belüftungseinrichtungen von raschlaufenden Dynamomaschinen* (E. T. Z. T. XXXIII, pp. 313, 343. 28/III, 4/IV-1912).

B. G. Lamme : *Some practical consideration in artificial ventilation of electrical machinery* (The El. J. T. III, p. 247, V-1916).

E. Knowlton : *Ventilation as a factor in the economical design of electrical machinery* (G. E. R. T. XIX, pp. 406, 595. V-VII-1916).

W. F. Dawson : *Measurement of losses and efficiency by temperature rise of ventilating air* (G. E. R. T. XXIII, p. 153. II-1920).

Digitized by Google

B. G. Lamme : *Ventilation and temperature problems in large turbogenerators* (The El. J. T. XVII, pp. 312, 345. VII-VIII-1920).

P. Bunet : *Refroidissement de machines électriques de grande puissance* (R. G. E. T. VIII, p. 314. 4/IX-1920).

K. Lubowsky : *Verfahren zur Bestimmung von Wärmeabgabekoeffizienten* (E. T. Z. T. XLII, p. 79. 27/I-1921).

C. J. Fechheimer : *Some elements of air flow in electrical machinery* (The El. J. T. XIX, pp. 345, 392, 471, 511. VIII-XII-1922) (The El. J. T. XX, pp. 73, 104, 171, 271, 305. II-VII-1923).

A. R. Smith : *Cooling of turbine generators* (G. E. R. T. XXV, p. 724. XII-1922 ; T. XXVI, pp. 83, 298, 554. II-V-VII-1923).

R. Pohl : *Grundsätzliches zur Wärmeberechnung elektrischer Maschinen, insbesondere der im Kreisprozess gekühlten Turbogeneratoren* (A. f. E. T. XII, p. 361. 30/VI-1923).

G. E. Luke : *The cooling of electric machines* (J. A. I. E. E. T. XLII, p. 1278. XII-1923).

Donald Bratt : *The multiple-radial system of cooling large turbogenerators* (J. A. I. E. E. T. XLIII, p. 185. III-1924).

C. J. Fechheimer : *An experimental study of ventilation of turboalternators* (J. A. I. E. E. T. XLIII, p. 416. V-1924).

C. J. Fechheimer : *Accomplissements in the study of cooling electric machines* (Power. T. LXI, p. 574. 14/IV-1925).

Ch. Rice : *Windage losses in air, hydrogen and carbon dioxyde* (G. E. R. T. XXVIII, p. 336. V-1925).

E. Knowlton, Ch. Rice, E. H. Freiburghouse : *Hydrogen as a cooling medium for electrical machinery* (J. A. I. E. E. T. XLIV, p. 724. VII-1925).

C. J. Fechheimer : *The influence of density upon the weight and volume of air which passes through an electrical machine* (The El. J. T. XXIII, p. 63. II-1926).

P. Bunet : *Refroidissement des grandes machines électriques* (I. E. T. XXXV, p. 149. 10/IV-1926).

F. D. Newbury : *A survey of heavy electrical machinery development (hydrogen cooling)* (The El. J. T. XXIII, p. 190. IV-1926).

M. Jakob : *Wasserstoff als Kühlmittel für elektrische Maschinen* (Z. d. V. D. I. T. LXX, p. 889, 26-VII-1926).

G. E. Luke : *Surface heat transfer in electric machines with forced air flow* (J. A. I. E. E. T. XLV, p. 1070, XI-1926).

IX. — Dispositifs de ventilation.

F. Niethammer : *Ventilation von Turbodynamos* (E. u. M. T. XXIV, p. 357, 22/IV-1906).

K. Czeija : *Entwicklung der Belüftungseinrichtungen von raschlaufenden Dynamomaschinen* (E. T. Z. T. XXXIII, pp. 313, 343, 28/III, 4/IV-1912).

W. Baum : *Air cleaning apparatus for the ventilation of generators and transformers* (G. E. R. T. XVIII p. 801, VIII-1915).

J. Shepherd : *Failures of turbo-generators and suggestion for improvements* (I. E. E. T. LVIII, p. 125 (265). II-1920).

H. G. Reist and E. H. Freiburghouse : *Investigation of water-air radiators for cooling generators and motors* (G. E. R. T. XXIII, p. 91. II-1920).

R. Pohl : *Vorschläge zur Verbesserung von Turbodynamos* (E. T. Z. T. XLI, p. 554. 15/VII-1920).

Digitized by Google

J. G. Monson : *Closed air circuit system of ventilation* (G. E. R. T. XXV, p. 750. XII-1922).

A. R. Smith : *Cooling of turbine generators* (G. E. R. T. XXV, p. 724. XII-1922 ; T. XXVI, pp. 83, 298, 554. II-V-VIII-1923).

R. Pohl : *Fortschritte im Turbogeneratorenbau* (E. T. Z. T. XLIV, pp. 729, 759. 2-9/IX-1923).

W. Bedbur und E. Stach : *Betriebsergebnisse mit Luftkühlern für Turbodynamos* (Z. d. V. D. I. T. LXVIII, p. 155. 16/II-1924).

P. Charpentier et C. Kesl : *Ventilation des salles de machines, machines, appareils électriques, transformateurs et postes de transformation* (Electricien : T. XLI, pp. 49, 145, 173. 1/II, 1-15/IV-1925 ; T. XLII, pp. 51, 97, 315. 1/II, 1/III, 15/VII-1926).

R. Pohl : *Uber Berechnung, Konstruktion und Betrieb von Luftkühlern für Turbogeneratoren* (E. T. Z. T. XLVI, p. 441. 26/III-1925).

D. F. Alexander : *The ventilation of large induction motors* (The El. J. T. XXII, p. 534. XI-1925).

An : *Air cooler for turbogenerators* (Eng. T. CXXI, p. 28. 1/I-1926).

F. S. Bennett : *Indirect cooling of turboalternators* (Power. T. LXIII, p. 400. 16/III-1926).

R. Pohl : *Neuzeitliche Turbogeneratoren und Luftkühler* (E. T. Z. T. XLVIII, pp. 161, 200, 320. 10-17/II, 10/III-1927).

X. — Mesure de la température.

M. E. Oelschlaeger : *Sur l'échauffement produit dans les conducteurs par les courants intenses* (E. T. Z. Mars 1885) (L. E. I. T. XVI, p. 29. 4/IV-1885).

E. Northrup : *Measurement of temperature by electrical means* (P. A. I. E. E. T. XXV, p. 219 (664). 30/V-1906).

F. Loppé : *Détermination de la température de régime d'une machine électrique* (I. E. T. XVI, p. 320. 25/VII-1907).

A. E. Kennelly, C. A. Wright, J. S. van Bylevelt : *The convection of heat from small copper wires* (P. A. I. E. E. T. XXVIII, p. 699. 28/VI-1909).

E. Hinlein : *Ein Beitrag zur Frage der Erwarmung der elektrischen Maschinen* (Z. d. V. I. T. LV, p. 730. 6/V-1911).

Associazione elettrotecnica italiana : *L'évaluation de la température des machines électriques au moyen du thermomètre à mercure* (I. E. T. XX, p. 391. 25/VIII-1911 ; T. XXI, p. 72. 10/II-1912).

H. G. Reist and T. S. Eden : *Method of determining temperature of alternating current generators and motors and room temperature* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 225. 26/II-1913).

L. W. Chubb, E. I. Chute, O. W. A. Oetting : *Measurement of temperature in rotating electric machines* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 583. 26/II-1913).

C. Fortescue : *Correction on transformer temperatures for variation in room temperature, taking into account both copper and iron losses* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 607. 26/II-1913).

J. A. Capp, L. T. Robinson : *Thermocouples and resistance coils for the determination of local temperatures in electrical machines* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 701. 26/II-1913).

H. D. Stephens : *Operating temperatures in large A.-C. generators* (E. W. T. LXXI. p. 663 (654). 30/III-1918).

S. F. Barclay, S. P. Smith : *The determination of the efficiency of the turboalternators* (I. E. E. T. LVII, p. 293. IV/1919).

Digitized by Google

M. JAKOB : *Zur Frage der Messung von Oberflachentemperaturen in der Elektrotechnik* (A. f. E, T. VIII, p. 126 (362). 28/VIII-1919).

F. KADE : *Zur Frage der Messung von Oberflachentemperaturen in der Elektrotechnik* (A. f. E. T. VIII, p. 296. 10/XI-1919).

G. KEINATH : *Die Temperaturmessung in elektrischen Maschinen* (E. u. M. T. XL. pp. 97, 113. 26/II, 5/III-1922).

J. B. SMITH : *Applications and limitations of thermocouples for measuring temperatures* (J. A. I. E. E. T. XLII, p. 171. II-1923).

H. T. LANGE : *Ambient temperature observations* (J. A. I. E. E. T. XLII, p. 1168. XI-1923).

AN : *Methods af testing electrical apparatus V : Temperature measurement* (The El. J. T. XXIII, p. 43. I-1926).

M. MOELLER : *Uber den Einbau der elektrischen Temperaturmessgeräte* (S. Z. T. II, p. 65. I-1926).

M. OYAMA : *The thermoradiometer* (The El. J. T. XXIV, p. 26. I-1927).

W. KUMMER : *Uber die Feststellung der wahrscheinlichsten Höchsttemperatur in Wicklungen* (B. A. S. E. T. XVIII, p. 352. VI-1927).

XI. — ESSAIS D'ÉCHAUFFEMENT.

F. W. CARTER : *Quelques notes sur les essais d'échauffement des machines électriques* (I. E. E. T. XXXII, p. 1104. VIII-1903) (E. E. T. XXXVIII, p. 77, 9/I-1904).

S. SENSTIUS : *Heat tests on alternators* (P. A. I. E. E. T. XXV, p. 333 (598). 28/V-1906).

S. E. JOHANNSEN, G. W. WADE : *Methods of determining temperature of transformers and cooling medium* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 253. 26/II-1913).

W. M. MC CONAHEY, C. FORTESCUE : *Methods of determining temperature of transformers* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 505. 26/II-1913).

F. D. NEWBURY : *Comparaison of methods of loading large A. C. and D. C. generators and synchronous converters for factory temperature tests* (P. A. I. E E. T. XXXII, p. 659. 26/II-1913).

M. L. KAHN : *Equivalent temperature tests of the various types of electrical machinery* (The Electrician. T. XC, p. 680. 22/VI-1923).

M. G. BALACHOWSKY : *Essais d'échauffement par la méthode des pertes alternées. Application aux alternateurs et moteurs synchrones* (E. et M. T. I, n° 5, p. 1. III-IV-1925).

S. L. HENDERSON : *Hot-spot temperature measurement in alternating-current generators* (The El. J. T. XXIII, p. 95. III-1926).

XII. — PRESCRIPTIONS ET NORMALISATIONS CONCERNANT L'ÉCHAUFFEMENT.

G. DETTMAR : *Uber die Nothwendigkeit der Aufstellung von Normen für die Bestimmung und Angabe von Leistung, Erwärmung und Wirkungsgrad elektrischer Maschinen* (E. T. Z. T. XXI, p. 727. 30/VIII-1900).

E. J. BRUNSWICK : *Sur la détermination de l'échauffement des circuits électriques des dynamos par la comparaison des résistances* (I. E. T. XVIII, p. 269, 10/VI-1909).

E. J. BRUNSWICK : *Températures admissibles dans les machines dynamos. Procédés de détermination, d'après les travaux de la première section du comité* (B. S. I. E. E. T. IX (2e), p. 585. 3/XI-1909).

E. J. BRUNSWICK : *Températures admissibles dans les machines dynamos ; procédés de détermination* (R. E. T. XIII, p. 48. 30/I-1910).

Digitized by Google

C. P. Steinmetz, B. G. Lamme : *Temperature and electrical insulation* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 111 (1679). 26/II-1913).

M. W. Day, R. A. Beekman : *Effect of room temperature on temperature rise of motors and generators* (P. A. I. E. E. T. XXXII, p. 415. 26/II-1913).

I. Gutmann : *Die Erwärmung elektrischer Maschinen und Transformatoren* (E. u. M. T. XXXIII, p. 421. 29/VIII-1915).

F. L. : *Les élévations de température admissibles dans les machines, d'après les règlements américains et allemands* (I. E. T. XXIV, p. 306. 25/IX-1915).

H. M. Hobart : *Electrical machinery tests and specifications based on modern standards* (P. A. I. E. E. T. XXXVI. 22/IX-1916).

F. D. Newbury : *Rational temperature guarantees for large A. C. generators* (P. A. I. E. E. T. XXXV, p. 1597 6/X-1916).

M. Vidmar : *Ein Vorschlag zur Ergänzung der Erwärmungsvorschriften* (E. u. M. T. XXXVI, pp. 49, 64. 3/II-1918).

A. C. Bunker : *Maximum-rated or 50-degree motor* (E. W. T. LXXV, p. 73. 10/I-1920).

Commission électrotechnique internationale : *Travaux concernant l'échauffement des machines électriques* (R. G. E. T. VII, p. 192. 7/II-1920).

J. M. Hipple : *The fifty degree rise method of motor rating* (The El. J. T. XVII, p. 203. V-1920).

E. Adler, C. Schiebeler : *Die Leistungsbewertung der Elektromotoren für aussetzende Betriebe* (E. T. Z. T. XLI, pp. 485, 508. 24-30/VI-1920).

H. M. Phillips : *Allowable temperature rise of motors* (Power. T. LIII, p. 62. 11/I-1921).

G. A. Juhlin : *Temperature limits of large alternators* (The Electrician. T. LXXXVI, p. 126 (121, 195, 197, 276). 28/I-1921).

F. B. Crocker : *Rating of electrical machinery* (E. W. T. LXXXVII, p. 977. 30/IV-1921).

R. Pohl : *Die zulässigen Höchsttemperaturen grosser Drehstromgeneratoren* (E. T. Z. T. XLII, p. 977. 1/IX-1921).

C. Schiebeler : *Bericht über die Arbeiten des Ausschusses für aussetzende Betriebe* (E. T. Z. T. XLII, p. 1081. 22/IX-1921).

H. Osborne : *Die Bestimmung der Erwärmung aus der Widerstandsmessung bei Kurzzeitbetrieben* (E. T. Z. T. XLII, p. 1511. 29/XII-1921).

W. B. Kouwenhoven : *Ambient temperature measurements* (J. A. I. E. E T. XLI, p. 635. IX-1922).

P. Girault : *Sur l'échauffement d'un organe de machine électrique soumis à des pertes dans le fer constantes et à des pertes par effet Joule* (R. G. E. T. XIV, p. 115. 28/VII-1923).

Commission électrotechnique internationale : *Discussions concernant l'échauffement des machines électriques et les mesures de l'échauffement* (R. G. E. T. XX, pp. 576, 611, 613. 23-30/X-1926).

M. Kloss : *Die Umgebungstemperatur und ihre Bedeutung für die Bewertung elektrischer Maschinen und Transformatoren* (E. T. Z. T. XLVIII, p. 1097. 4/VIII-1927).

Digitized by Google

ABREVIATIONS ADOPTEES

A. f. E.	Archiv für Elektrotechnik.
B. A. S. E.	Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens.
B. S. F. E.	Bulletin de la Société Française des Electriciens.
B. S. I. E.	Bulletin de la Société Internationale des Electriciens.
E. E.	Eclairage Electrique.
E. et M.	Electricité et Mécanique.
E. K. B.	Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen.
Eng.	Engineering.
E. T. Z.	Elektrotechnische Zeitschrift.
E. u. M.	Elektrotechnik und Maschinenbau.
E. W.	Electrical World.
G. E. R.	General Electric Rewiew.
I. E.	Industrie Electrique.
I. E. E.	Journal of the Institution of Electrical Engineers.
J. A. I. E. E.	Journal of the American Institute of Electrical Engineers.
L. E. I.	Lumière Electrique, 1re série.
L. E. II.	Lumière Electrique, 2e série.
P. A. I. E. E.	Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers.
R. E.	Revue Electrique.
R. G. E.	Revue Générale de l'Electricité.
S. Z.	Siemens Zeitschrift.
The El. J.	The Electric Journal.
Z. d. V. D. I.	Zeitschrift des Vereines Deutcher Ingenieure.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

Pages.

Introduction 840

CHAPITRE II

LOIS FONDAMENTALES DE LA THÉORIE ANALYTIQUE DE LA CHALEUR

1. Conductibilité intérieure et flux de chaleur 843
2. Conservation de la chaleur. Equations de Poisson et de Laplace 848
3. Conductibilité extérieure et conditions à la surface 851

CHAPITRE III

VALEURS PRATIQUES DES CONSTANTES THERMIQUES

4. Conductibilité thermique K des matières employées dans la construction électrotechnique 859
5. Coefficients d'émission de chaleur h 864

CHAPITRE IV

PROBLÈMES A UNE SEULE DIMENSION

6. Problème du Mur 865
7. La répartition de la température dans le cuivre du stator des machines à courants alternatifs 867
α. Première hypothèse .....
β. Deuxième hypothèse .....
8. Application numérique à un cas pratique des résultats obtenus dans le paragraphe 7 879
9. La répartition de la température dans l'encoche du rotor d'un turboalternateur 884
10. Application à un cas pratique des résultats obtenus dans le paragraphe 9. 896

CHAPITRE V

PROBLÈMES A DEUX DIMENSIONS

11. Propagation de la chaleur dans un solide rectangulaire infini (Séries de Fourier ordinaires) 901
12. Propagation de la chaleur dans un prisme rectangulaire (Deuxième problème de Fourier amenant aux séries généralisées) 907
13. La répartition de la température dans les sections droites d'une colonne de transformateur ou d'une bobine inductrice. Cas symétrique 921
14. Recherches expérimentales sur la répartition de la température dans une section de colonne de transformateur et comparaison avec la théorie. 926
15. Répartition de la température dans la section d'une bobine inductrice. Premier cas dissymétrique 932
16. Recherches expérimentales sur la répartition de la température dans la section d'une bobine inductrice et comparaison avec la théorie 939
17. Cas général de la répartition de la température dans la section d'une bobine inductrice. Conclusion 944
18. Tables donnant les valeurs des fonctions S 949

CHAPITRE VI

Bibliographie 954

L'Imprimeur-Editeur : Etienne Chiron, Paris.

Digitized by Google

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE (1)

Rapports présentés à la Semaine d'Octobre 1927 (2) *(suite)*.

1re *Section* (suite). — La forme d'onde de la tension en charge dans les alternateurs (M. Ricalens), p. 969. — Fonctionnement en régime amorcé d'une génératrice asynchrone isolée (MM. Langlois et Letrillart), p. 973.

3e *Section*. — Système de réglage des fours électriques à résistance et à arcs (M. Mathieu), p. 1007. — La soudure électrique (M. Languepin), p. 1031. — L'Arc électrique de soudure (M. Brillié), p 1065.

4e *Section*. — Système de traction A.D R. à courant continu, à démarrage sans résistances et à récupération d'énergie (M. della Riccia), p. 1089.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

(2) Les autres rapports présentés paraîtront dans le *Bulletin* d'Octobre 1927.

Digitized by Google

Digitized by Google

LA FORME D'ONDE DE LA TENSION EN CHARGE DANS LES ALTERNATEURS

par M. Ricalens

Ingénieur à la Société Alsacienne de constructions mécaniques.

L'auteur rappelle que la forme de la courbe de tension d'un alternateur en charge dépend de l'état et de la nature de la charge; les harmoniques peuvent prendre naissance dans le circuit extérieur, par exemples dans les transformateurs, la forme de la courbe varie suivant le couplage avec d'autres machines. Elle ne pourrait donc être garantie que pour une charge bien déterminée, ce qui serait sans intérêt dans l'exploitation, et la forme sinusoïdale de la tension à vide semble être la seule condition à imposer au constructeur.

De nombreuses études ont été publiées récemment, dues en particulier à l'initiative de la première section de la Société Française des Electriciens, sur les méthodes de mesure de la déformation d'onde en courant alternatif. Les règles complémentaires de la Chambre syndicale des Constructeurs de gros matériel électrique, donnent une définition pour le coefficient de déformation d'une onde. C'est d'après cette définition que les contrats imposent généralement une forme d'onde à la tension à vide des alternateurs; mais certains exploitants font remarquer que c'est la tension en charge qu'ils ont intérêt à avoir pure de tout harmonique et que c'est à la tension en charge et non à la tension à vide qu'il faut imposer une valeur maxima de la déformation.

La difficulté vient de ce que la forme de tension en charge n'est pas une qualité intrinsèque de la machine, mais une qualité essentiellement variable qui dérive de la conjugaison d'un réseau et d'un alternateur et qui dépend de l'état de charge et de la nature de la charge de l'alternateur.

On peut arriver, dans un alternateur même à pôles saillants, à avoir une forme de la courbe de l'intensité de champ à vide assez voisine de la sinusoïde en donnant à la pièce polaire une forme convenable. C'est une courbe symétrique ne contenant pas d'harmonique de rang pair, et qui peut d'ailleurs être déterminée de façon à ne pas contenir d'harmonique 3 ou multiple de 3. Une première cause de déformation de la tension en charge est la réaction d'induit. Si on ne tient pas compte des phénomènes de saturation, la courbe de l'intensité du

Digitized by Google

champ en charge est la résultante des courbes de l'intensité du champ inducteur et du champ de réaction d'induit. Cette courbe reste théoriquement symétrique et sinusoïdale, si ses deux composantes sont elles-mêmes sinusoïdales et cela quel que soit le déphasage des deux composantes. Nous avons vu que la forme de l'intensité de champ à vide peut être amenée à une forme très voisine d'une sinusoïde. Mais on est forcément limité par des considérations d'exécution pratique. Ainsi, la recherche d'un tel résultat conduirait en tout cas à avoir un induit parfaitement lisse, des dents très éloignées de la saturation; un alternateur à pôles saillants devrait avoir une pièce polaire dépassant largement les 2/3 du pas polaire et les fuites dans les inducteurs prendraient une grosse importance. Pour une machine à rotor lisse et entrefer constant, du genre turboalternateur, on serait amené à répartir l'enroulement suivant une loi sinusoïdale dans une infinité d'encoches, ce qui n'est évidemment pas réalisable, et les encoches devraient être fermées.

Un des moyens les plus efficaces et les plus simples que l'on utilise pour réduire dans la forme de la tension l'importance de ces harmoniques, dont on doit se résigner à admettre l'existence dans la courbe de l'intensité de champ à vide, est le bobinage des alternateurs avec un pas raccourci (ou allongé) par rapport au pas polaire. On peut raccourcir le pas à la valeur qui réduit à zéro l'un des harmoniques ou bien admettre une valeur de raccourcissement qui diminue considérablement deux harmoniques choisis. Cette disposition présente l'avantage d'améliorer également la forme du champ de réaction d'induit en y réduisant dans la même proportion les mêmes harmoniques, lorsque l'enroulement comporte deux faisceaux de conducteurs par encoche et que chaque faisceau appartient à une nappe de conducteurs différents.

Nous n'indiquons que pour mémoire le phénomène bien connu des harmoniques de denture que l'on sait d'ailleurs parfaitement faire disparaître en obliquant les encoches de l'induit d'un pas dentaire ou en employant une division à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase.

Le fonctionnement en charge est l'origine de nouvelles déformations du fait de la réaction d'induit. Les deux courbes de l'intensité de champ inducteur et induit n'étant pas des sinusoïdes, leur résultante est une courbe présentant des dissymétries variables selon le déphasage du courant et de la tension. Cette dissymétrie subsiste, atténuée, dans la forme de l'onde de tension.

Digitized by Google

Dès lors la tension aux bornes de l'alternateur apparaît comme étant de la forme :

$$e = E_0 + E_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + E_2 \sin(2\omega t - \varphi_2) + \ldots$$

Dans ces conditions, chaque terme de cette décomposition produit la circulation d'un courant harmonique du même ordre et qui peut atteindre des valeurs considérables, théoriquement infinies dans le cas de résonance s'il n'y avait pas d'amortissement, les harmoniques d'ordre élevé étant étouffés par la présence d'une self inductance et au contraire exagérés par la présence d'une capacité. La déformation du courant réagit sur la forme de la tension en intervenant par la réactance asynchrone qui correspond à l'harmonique de l'ordre considéré. Mais ces courants harmoniques peuvent prendre naissance sans qu'il ait préexisté des harmoniques dans la tension de l'alternateur; ainsi, un transformateur saturé détermine l'apparition de courant d'harmonique 3 et d'ordre supérieur. La présence au contraire de câbles introduisant des capacités importantes, peut mettre en résonance des courants harmoniques d'ordre élevé, par exemple celui de la fréquence qui correspond aux harmoniques de denture. La présence de transformateurs ayant un montage étoile-étoile, surtout de transformateurs monophasés connectés entre une phase et le neutre, introduit des courants d'harmonique 3. Toutes ces remarques sont valables pour le cas où l'alternateur fonctionnant sur un réseau, seule machine synchrone, est branché en somme sur des résistances mortes, des capacités ou des selfs inductances, transformateurs, moteurs asynchrones.

Dès lors que l'alternateur est couplé sur un réseau en même temps que d'autres machines synchrones, il apparaît une forme de tension résultante qui dépend en particulier des réactances que rencontrent les différents harmoniques pour se propager. C'est un fait souvent observé que la forme de la tension relevée sur un réseau change très nettement de caractère aux diverses heures de la journée. Ces modifications sont pour une part attribuables aux variations de charge, mais surtout aux différents couplages, variant selon l'heure, qui réunissent des centrales électriques ayant des courbes de tension différentes.

Si on voulait imposer des conditions à la forme de la tension en charge, ce devrait être évidemment lorsque l'alternateur fonctionne sur un réseau, seule machine synchrone. On se rend facilement compte que, si on branche sur un réseau important un petit alternateur, sa présence ne modifiera pas la courbe de tension du réseau et

Digitized by Google

la tension qu'on relèvera aux bornes de l'alternateur sera simplement celle du réseau. Mais, même en admettant qu'il n'y ait pas d'autre machine synchrone, ce qui arrive fréquemment, on serait amené à des restrictions considérables. Il est bien certain que la même machine ne pourra donner une courbe de tension aussi favorable pour deux charges différant, soit par l'intensité du courant, soit par le facteur de puissance sous lequel on débite ce courant. La forme de tension serait donc à garantir pour une charge bien déterminée, et cette charge devrait être constituée par des circuits ne contenant pas de fer saturé et naturellement pas par des machines synchrones surexcitées ou sous-excitées. La réalisation de telles résistances, self inductances ou capacités serait pratiquement impossible pour des alternateurs d'une puissance quelque peu importante. On peut même aller plus loin et se demander à quelle nature de charge il faudrait faire correspondre la garantie pour un compensateur synchrone, appelé dans certains cas à fonctionner comme self inductance au lieu de fonctionner comme capacité.

Il y aurait bien une solution approchée, qui consisterait à avoir une bonne courbe de tension à vide et à réduire la réaction d'induit le plus possible pour que l'influence de la variation de charge fût moins sensible. Il est évident que cette solution conduirait à des machines coûteuses et de puissance extrêmement limitée.

Il semble donc que la condition de forme de tension à vide qui, pour le compensateur synchrone par exemple, est une condition moyenne entre la marche surexcitée et la marche sousexcitée, doive seule être retenue. Les mêmes dispositions, — par exemple emploi d'un pas raccourci — qui amélioreront la forme de tension à vide, limiteront également l'importance des harmoniques introduits par la marche en charge et le constructeur sera aussi bien conduit à les adopter par une réglementation de la forme de tension à vide que par une réglementation de la forme de tension en charge.

La conclusion qui se dégage de ces quelques remarques est l'impossibilité d'imposer une réglementation de la forme de la tension en charge. Cette réglementation n'apporterait pas de nouvelles garanties à l'exploitant et en général il serait même impossible de contrôler son observation. La forme sinusoïdale de la tension à vide d'un alternateur semble donc la seule condition à imposer au constructeur.

Digitized by Google

LE FONCTIONNEMENT EN REGIME AMORCÉ D'UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE ISOLÉE

par MM. R. Langlois et P. Letrillart,

Ingénieurs aux Ateliers de Constructions électriques de Jeumont.

I. *Généralités : position du problème ; rôle du rémanent ; condition limite d'amorçage ; rôle de la saturation.*

II. *Etude particulière des conditions limites et de la fréquence d'amorçage : machine d'induction simple sur capacité ; machine série à collecteur ; applications au moteur autocompensé et au moteur shunt à double jeu de balais.*

III. *Caractéristiques en charge en régime amorcé : moteurs autocompensés shunt à double jeu de balais, et asynchrones avec changeur de fréquence.*

Première partie. — Généralités.

1. — *Position du problème.*

Nous considérons le système constitué par une machine ou, plus généralement, par un groupe de machines en liaison électrique et mécanique.

Ce système est supposé au repos, à l'état inerte, c'est-à-dire qu'il n'existe aucun courant et aucun flux, par suite aucun phénomène électromagnétique : seulement du fer et du cuivre en présence. On entraîne la machine, par un moyen extérieur, à une certaine vitesse. Il peut alors arriver qu'un régime bien déterminé de flux et de courants s'installe, la machine est dite amorcée et fonctionne en auto-excitation.

De quelle façon ce phénomène prend-il naissance, quelles sont ses conditions nécessaires et suffisantes, et quelles sont les caractéristiques de la machine dans ce mode de fonctionnement? tel est notre problème.

Nous considérerons par extension le cas où il existe dans le système des condensateurs statiques : l'ensemble des machines et des condensateurs constitue encore à l'arrêt un système inerte.

Digitized by Google

Le problème tel que nous venons de le poser, est classique en courants continus : on connaît, dans le cas des machines série et shunt, les conditions nécessaires et suffisantes du phénomène, et on sait prédéterminer les caractéristiques dans le fonctionnement en auto-excitation.

En courants alternatifs polyphasés, le phénomène existe également mais ses conditions sont plus complexes ; nous nous proposons d'étudier ici quelques cas particuliers et de montrer le parti utile que l'on peut tirer d'un tel mode de fonctionnement. Le problème qui nous occupe, est en effet susceptible d'applications pratiques dans différents cas : on ne dispose pas toujours d'une ligne de distribution à tension et fréquence constantes, ou bien la tension du réseau peut venir à manquer. En pareil cas, un fonctionnement industriel des machines à courants alternatifs asynchrones d'une installation peut il être envisagé en dehors de l'emploi de toute génératrice synchrone à excitation séparée, jouant le rôle de chef d'orchestre pour fixer la tension et la fréquence? Autrement dit, la machine asynchrone peut-elle se passer de la machine synchrone?

Nous verrons que l'on peut répondre affirmativement à cette question dans un certain nombre de cas.

Nous laisserons de côté, dans la présente étude, les fonctionnements accidentels en auto-excitation qui peuvent se superposer, dans certains cas, au fonctionnement régulier sur un réseau et pour lesquels il faut mettre en cause les harmoniques.

Nous nous limiterons donc en définitive aux cas sinusoïdaux et réguliers, qui se prêtent plus facilement à l'analyse algébrique.

2. — *Le rôle du rémanent.*

L'amorçage à partir d'un état inerte ne peut se concevoir que s'il existe un magnétisme rémanent dans le fer. Quel que soit le fer employé, même sous forme de tôles de fer doux, il possède toujours un rémanent plus ou moins accusé, qui suffit à déclencher le phénomène progressif dont le mécanisme est le suivant : le rémanent induit une faible tension qui engendre un courant magnétisant. Le passage de ce courant renforce le rémanent, la tension augmente, le courant augmente à nouveau, etc... et le phénomène est limité par la saturation. Quel que soit le genre de machine considérée, il faut toujours invoquer ce mécanisme.

L'amorçage s'établissant de proche en proche, n'est pas instantané.

Digitized by Google

Mais il peut être extrêmement rapide et provoquer par suite un à-coup de couple très brutal. Il ne faut donc pas le provoquer sans précautions.

Pour que l'amorçage puisse apparaître suivant le mécanisme indiqué, il faut qu'il existe dans la machine un circuit fermé dans lequel le courant magnétisant puisse s'établir. Le circuit d'induit doit pour cela être fermé sur un circuit récepteur qui peut être le circuit d'utilisation ou un circuit particulier de la machine.

3. — *La condition limite d'amorçage.*

Nous allons montrer que, après la condition d'existence d'un rémanent, une certaine relation entre les constantes des circuits est nécessaire à l'amorçage. Raisonnons d'abord sur le cas du courant continu, pour partir de considérations bien connues.

Pour la machine série, si R_e est la résistance du circuit extérieur, la tension à ses bornes pour un courant I est $R_e I$. La tension aux bornes de l'induit pour la vitesse de rotation N est

$$E - \rho I$$

E étant la force électromotrice correspondant au courant I et à la vitesse N et ρ la résistance intérieure.

On a la relation

$$E - \rho I = R_e I \qquad \text{ou} \qquad E = (R_e + \rho) I.$$

Or en régime non saturé

$$E = KI$$

K étant une constante.

La condition réalisée au moment de l'amorçage en régime non saturé est :

$$K = R_e + \rho.$$

Une construction graphique permet d'interpréter cette relation :

Portons (fig. 1) en ordonnées la tension aux bornes et en abscisses le courant.

La tension du circuit d'utilisation est représentée par la droite OA de coefficient angulaire $R_e + \rho = \operatorname{tg} \alpha_1$ en supposant la machine dénuée de résistance et sa résistance transportée dans le circuit extérieur.

Celle de la machine est représentée par la courbe de magnétisme C, de coefficient angulaire $K = \operatorname{tg} \alpha_2$ dans la partie non saturée. L'amorçage est impossible si $\operatorname{tg} \alpha_1 > \operatorname{tg} \alpha_2$.

Digitized by Google

La droite Δ coupe la courbe de magnétisme pour $\operatorname{tg} \alpha_1 < \operatorname{tg} \alpha_2$; il y aura donc encore amorçage dans ce cas, à cause de la saturation. L'intersection correspond à un courant d'autant plus élevé que l'inclinaison de la droite est plus faible et la machine moins saturée.

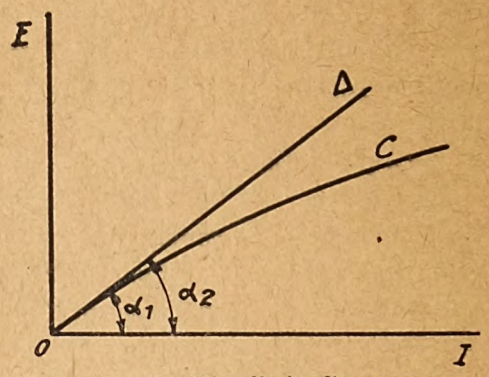


Fig. 1. — Condition limite d'amorçage.

Le courant d'amorçage peut prendre une valeur considérable et par suite dangereuse.

On peut donc se placer avec certitude en dehors de toute possibilité d'amorçage avec $R_e + \rho > K$.

Dans le cas de la machine shunt, le même raisonnement s'applique, R_e désignant la résistance des électros shunt et du rhéostat d'excitation.

En courants alternatifs, il se pose d'abord une question de fréquence, car la fréquence qui s'établit dans le circuit amorcé peut différer de celle de la rotation.

Supposons que, la machine étant entraînée à vitesse constante N_0, elle s'amorce à la fréquence f.

La polarité de la machine étant $2p$, on peut définir les grandeurs suivantes :

Fréquence et pulsation de la rotation : $f_0 = \dfrac{pN_0}{60}$ $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Vitesse de synchronisme et pulsation correspondant à la fréquence de l'amorçage $Ns = \dfrac{60f}{p}$ $\omega = 2\pi f$.

Glissement $g = \dfrac{Ns - N_0}{N_s} = \dfrac{\omega - \omega_0}{\omega}$.

Lorsqu'un fonctionnement amorcé est établi, les relations habi-

Digitized by Google

tuelles exprimant l'impédance équivalente à la machine sont applicables, il convient seulement de remplacer la pulsation ω, constante dans le cas d'un réseau, par son expression en fonction de la valeur constante ω_0 et de g :

$$\omega = \frac{\omega_0}{1-g}.$$

En second lieu, en courants alternatifs, le courant qui passe dans le circuit fermé qui est le siège de l'amorçage, comporte une composante wattée et une composante déwattée.

La tension aux bornes pour la fréquence ω est $(R_1 + j\omega L_1)I$, R_1 et L_1 étant la résistance et l'inductance totale équivalentes de la machine, expressions que l'on désigne parfois sous le nom de résistance et inductance dynamiques.

Le circuit extérieur comporte une résistance R_e et une inductance ωL_e, la tension à ses bornes est

$$(R_e + j\omega L_e)I$$

et par suite, on aura les deux relations

$$R_1 + R_e = 0,$$
$$\omega L_1 + \omega L_e = 0.$$

Il est à remarquer que la pulsation d'amorçage qui paraît s'éliminer dans ces expressions, y figure au contraire en général sous une forme plus ou moins complexe, car les termes R_1 et L_1 en dépendent.

Ces relations doivent être simultanément satisfaites lors de l'amorçage, si l'on suppose la machine non saturée.

4. — *Le rôle de la saturation.*

Nous avons vu en courants continus que la condition limite d'amorçage se traduisait par le fait qu'une certaine droite dépendant des constantes du circuit extérieur était confondue avec la partie rectiligne de la courbe de magnétisation.

En courants alternatifs il en est de même : il n'est pas possible que la machine se fixe à un régime de courants et de tensions bien déterminé, si l'on fait abstraction de la saturation.

Les conditions que nous avons indiquées pour l'amorçage ne représentent donc qu'un cas limite, et nous verrons que l'on est conduit à remplacer l'une des égalités du paragraphe précédent par une inégalité pour en tenir compte.

Digitized by Google

5. — *Caractéristiques en régime amorcé.*

En régime amorcé, il s'agit d'un fonctionnement sur la partie du diagramme qui correspond à la marche en génératrice; cette simple remarque permet de déduire *a priori* certaines conditions générales du phénomène.

Mais, tandis que dans le fonctionnement en moteur ou en génératrice couplée sur un réseau, la saturation de la machine n'a qu'une importance secondaire au point de vue des caractéristiques, il n'en est pas de même ici; le rôle de la saturation est prédominant.

Dans le cas des machines série et shunt à courant continu, on sait déduire aisément la caractéristique externe, de la courbe de magnétisation et des résistances (à la réaction d'induit près). En courants alternatifs, les choses sont moins simples, car il est difficile de faire intervenir la saturation dans les calculs, la méthode des coefficients d'induction devenant inopérante. En outre, comme ce sont les conditions de saturation qui fixent la tension et le courant débités, on conçoit qu'une machine prévue pour fonctionner en moteur sur un réseau dans des conditions de saturation moyenne ou faible, pourra s'amorcer à une tension très supérieure à celle pour laquelle elle était établie en moteur, et le réglage de cette tension est difficile, car on ne dispose pas, comme en courant continu, des facilités de réglage par l'excitation.

En outre, il ne suffit pas de considérer une seule caractéristique externe, mais un ensemble de caractéristiques de la tension en fonction de la charge à $\cos\varphi$ constant, car le circuit sur lequel débite la génératrice à vitesse constante sera constitué en général par un récepteur absorbant une puissance wattée et déwattée bien déterminée.

Quand la charge varie, la vitesse restant constante, la fréquence varie également, ce qui complique les calculs.

Aussi ne prétendons-nous pas résoudre dans cette brève note un problème aussi complexe.

Nous indiquerons d'abord comment on peut prédéterminer les conditions limites et la fréquence de l'amorçage; et dans la dernière partie nous illustrerons, par des résultats d'essais, les possibilités de fonctionnement autonome des machines asynchrones.

Deuxième partie. — Conditions limites et fréquence d'amorçage.

Nous considérerons les deux cas fondamentaux suivants :

Digitized by Google

a) La machine d'induction simple sur capacité ;

b) La machine série à collecteur polyphasée sur résistance.

Nous indiquerons ensuite la marche à suivre pour traiter les cas plus complexes.

a) *La machine d'induction simple sur capacité.*

Nous considérons une machine d'induction à rotor en court-circuit entraînée à vitesse constante et dont le primaire est fermé sur capacités.

Ce cas a été considéré par MM. Bethenod (R. G. E. septembre 1923), Sordina (Elettrotecnica, mai 1921).

Il correspond à un problème pratique important dans l'étude des lignes de transport d'énergie : celui d'un turbo-alternateur à rotor lisse, muni d'un amortisseur et fermé sur une ligne à vide douée de capacité (Roth, conférence internationale des Grands Réseaux 1925). Nous reprendrons sous une forme légèrement différente le calcul de M. Bethenod, en suivant la marche générale indiquée dans le paragraphe précédent.

L'impédance équivalente à la machine est :

$$Z = a + bj$$

avec

$$a = R_1 + \frac{\frac{R_2}{g}\omega^2 M^2}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (\omega L_2)^2},$$

$$b = \omega L_1 + \frac{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + \sigma(\omega L_2)^2}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Si R_e est la résistance du circuit extérieur et C sa capacité, son impédance est

$$Ze = R_e - \frac{j}{C\omega}$$

ω étant la pulsation de l'amorçage

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 - g}.$$

Les conditions de l'amorçage sont :

$$a + R_e = 0 \qquad (1)$$

$$b = \frac{1}{C\omega}. \qquad (2)$$

Digitized by Google

Ecrivons

$$\lambda = \frac{R_2}{\omega_0 L_2}$$

et

$$f(g) = \frac{g}{\lambda^2(1-g)^2 + g^2}.$$

La relation (1) devient :

$$R_1 + R_e = -\left(\frac{M}{L_2}\right)^2 R_2 f(g). \qquad (3)$$

La fonction $f(g)$ a le signe de g, la relation (3) indique donc que g est nécessairement négatif.

Cette conclusion est d'ailleurs évidente *à priori*, car la machine ne peut être génératrice que si son fonctionnement est hypersynchrone en se rapportant aux conditions bien connues de fonctionnement de la machine d'induction en moteur et en génératrice.

La fonction $f(g)$ passe par un maximum pour

$$g = -\frac{\lambda}{\sqrt{1+\lambda^2}}$$

comme λ est petit, cette valeur est sensiblement :

$$g = -\lambda$$

et l'on a

$$f(g) = -\frac{1}{2\lambda}.$$

La condition (3) ne peut être satisfaite que si

$$\frac{R_1 + R_e}{\left(\frac{M}{L_2}\right)^2 R_2} \leqslant \frac{1}{2\lambda}$$

c'est-à-dire si

$$R_1 + R_e \leqslant \frac{1-\sigma}{2}\omega_0 L_1$$

relation indépendante de la valeur de la capacité C.

La relation (2) s'écrit :

$$\frac{1}{CL_1\omega^2} = \frac{(R_2)^2 + \sigma g^2(\omega L_2)^2}{(R_2)^2 + g^2(\omega L_2)^2}.$$

A chaque valeur de la capacité correspond une valeur déterminée de la fréquence d'amorçage.

Digitized by Google

Cette fréquence est d'ailleurs toujours voisine de ω_0, car λ est petit et nous avons vu que la valeur absolue de g différait peu de λ. Finale-

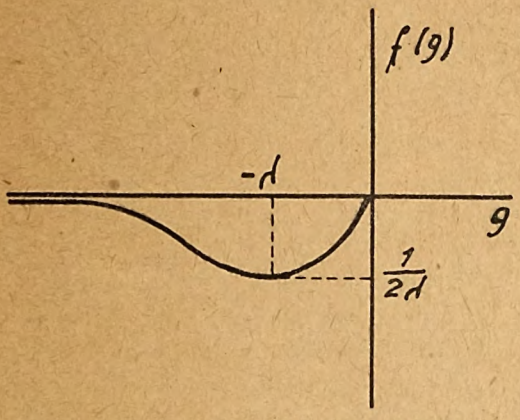


Fig. 2. — Variation de la fonction $f(g)$

ment la seconde relation peut s'écrire sans grande erreur

$$CL_1\omega_0^2 = 1.$$

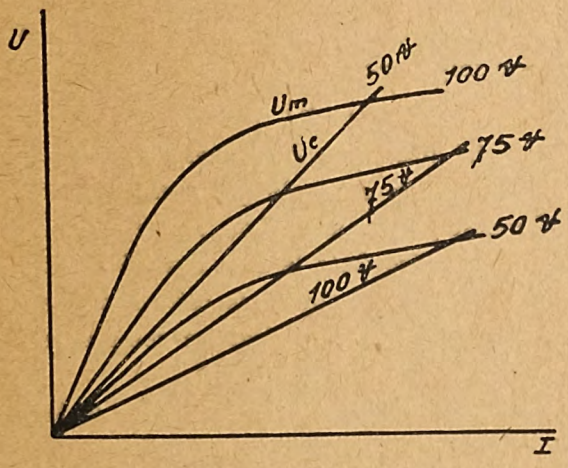


Fig. 3. — Fréquence d'amorçage.

On peut alors représenter le courant magnétisant du moteur et le courant dans les condensateurs pour différentes fréquences, la fréquence considérée étant celle de rotation pour la machine et celle de l'amorçage pour le condensateur, fréquences que nous pouvons considérer comme pratiquement égales entre elles. Quand la fré-

Digitized by Google

quence croît, à intensité égale, la tension aux bornes de la machine monte, tandis qu'elle décroît aux bornes des condensateurs. Les deux courbes se coupent nécessairement. Le point d'intersection est le point de fonctionnement normal à la fréquence envisagée.

Le tracé qui précède met en évidence le fait que la condition

$$CL\omega_0^2 = 1$$

est une condition limite, qui doit être remplacée par une inégalité eu égard à la saturation.

En effet, l'équation de la droite de capacité est

$$U_c = \frac{I}{C\omega_0}$$

et l'équation de la partie rectiligne de la courbe de magnétisation est

$$U_m = L\omega_0 I.$$

La possibilité de l'intersection est

$$CL\omega_0^2 < 1.$$

b) *La machine série à collecteur.*

Nous considérons le cas suivant :

Une machine série à collecteur tourne à la vitesse N_0 et son rotor est fermé sur une impédance

$$Z_e = R_e + j\omega L_e$$

Ce problème a été traité par Rüdenberg dans un cas particulier. Nous suivrons la méthode générale qui a été indiquée. Remarquons que, pour qu'il puisse y avoir amorçage, les balais doivent être décalés en génératrice, c'est-à-dire dans le sens opposé à la rotation à partir de la ligne neutre. Ce n'est que dans cette zone de calages que la machine est susceptible d'être génératrice comme le montre l'étude du diagramme connu de la machine série.

L'impédance équivalente peut se mettre sous la forme

$$Z = a + bj = R + j\left[\omega L_1 - K\omega M + g\left(\omega L_2 - \frac{1}{K}\omega M\right)\right]$$

ωL_1, inductance du stator ;

ωL_2, inductance du rotor ;

R, résistance totale de la machine ;

$K = \cos\alpha + j \sin\alpha$, coefficient dû au décalage des balais.

Désignons par $Z_e = R_e + j\omega L_e$ l'impédance extérieure sur laquelle est fermée la machine.

Digitized by Google

Les conditions de l'amorçage sont donc :

$$b = \omega L_e$$
$$a + R_e = 0.$$

La seconde relation s'écrit :

$$R + R_e = \omega M(1 - g) \sin \alpha = \omega_0 M \sin \alpha$$

elle est indépendante de la fréquence : la résistance n'a pas d'influence sur la fréquence.

La première condition s'écrit :

$$\omega L_1 - \omega M \cos \alpha + g\omega L_2 - g\omega M \cos \alpha + \omega L_e = 0$$

ou en remplaçant ωM et ωL_2 en fonction de ωL_1

$$1 - (1 + g)\frac{\beta}{\mu_1} \cos \alpha + g\beta^2 \frac{\mu_1}{\mu_2} + \frac{L_e}{L_1} = 0.$$

Au lieu de conserver la variable g, nous utiliserons dans la discussion la variable s, reliée à g par la relation

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{g}{g - 1}.$$

Il vient :

$$s = \frac{\frac{\beta}{\mu_1} \cos \alpha + 1 + \frac{L_e}{L_1}}{\beta^2 \frac{\mu_1}{\mu_2} + 2\frac{\beta}{\mu_1} \cos \alpha + 1 + \frac{L_e}{L_1}}.$$

Il existe donc une relation entre le rapport de transformation, le calage et le glissement. La fréquence varie, toutes choses égales, avec l'inductance du circuit extérieur; on reconnaît que la fréquence d'amorçage diminue toujours quand l'inductance extérieure augmente.

Exemple :

Supposons $\beta = 1$ et pour simplifier $\mu_1 = \mu_2 = 1$

$$s = \frac{1 + \cos \alpha + \frac{L_e}{L_1}}{2 + 2 \cos \alpha + \frac{L_e}{L_1}}$$

faisons $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$$s = \frac{1 + \frac{L_e}{L_1}}{2 + \frac{L_e}{L_1}}$$

Digitized by Google

$$L_r = 0 \qquad f = \frac{1}{2} f_0$$

$$L_r = L_1 \qquad f = \frac{1}{3} f_0$$

$$L_r = 2L_1 \qquad f = \frac{3}{4} f_0.$$

Cas particulier :

Si le circuit extérieur sur lequel est fermé la machine est constitué par une résistance non inductive, la première condition devient :

$$s = \frac{\frac{\beta}{\mu_1} \cos \alpha + 1}{\beta^2 \frac{\mu_1}{\mu_2} + 2 \frac{\beta}{\mu_1} \cos \alpha + 1}.$$

Pour une machine donnée β est bien déterminé. A chaque décalage des balais, correspond une valeur de s et une pulsation d'amorçage $\omega = \omega_0 (1 - s)$. La fréquence d'amorçage est proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine et varie avec l'angle de décalage des balais.

Négligeons les fuites pour simplifier et étudions la variation de s en fonction de α.

s passe par un maximum et un minimum pour $\alpha = 0$ et $\alpha = \pi$.

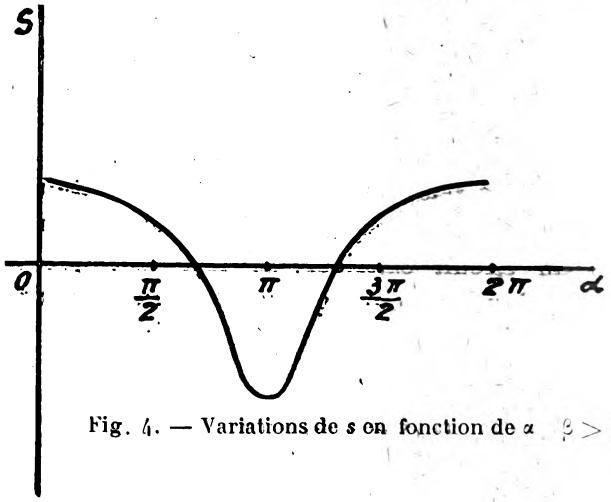


Fig. 4. — Variations de s en fonction de α $\beta > 1$

1er cas : $\beta > 1$

pour

$$\alpha = 0 \text{ et } 2\pi \qquad s = \frac{1}{1+\beta}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \text{ et } 3\frac{\pi}{2} \qquad s = \frac{1}{1+\beta^2}$$

$$\alpha = \pi \qquad s = \frac{1}{1-\beta}$$

$$\cos \alpha = -\frac{1}{\beta} \qquad s = 0.$$

Digitized by Google

2e cas : $\beta < 1$

pour $\alpha = 0$ et 2π $\quad s = \frac{1}{1+\beta}$

$\alpha = \frac{\pi}{2}$ et $3\frac{\pi}{2}$ $\quad s = \frac{1}{1+\beta^2}$

$\alpha = \pi$ $\quad s = \frac{1}{1-\beta}$

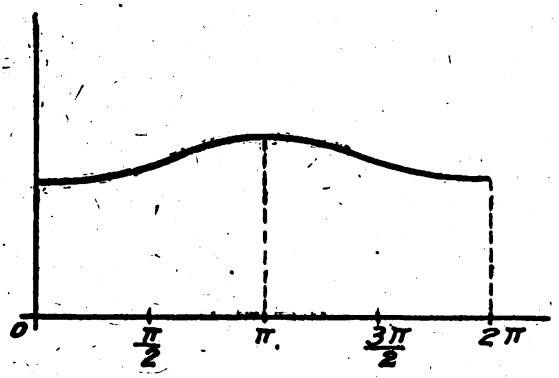


Fig. 5. — Variations de s en fonction de α $\quad \beta < 1$.

Dans le 1er cas s s'annule en changeant de signe, cela signifie que la fréquence de rotation du champ tournant est égale à la fréquence de la rotation pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

On obtient du courant continu quand $s = 1$, ce qui ne se produit jamais avec $\beta > 1$, puisque les valeurs extrêmes de s sont $\frac{1}{1+\beta}$ et $\frac{1}{1-\beta}$.

Quand $\beta < 1$, cette condition est réalisée pour $-\cos\alpha = \beta$.

On obtient alors du courant continu quelle que soit la vitesse de rotation de la machine.

3e cas : $\beta = 1$.

Alors $s = \frac{1}{2}$, la fréquence d'amorçage est toujours égale à la demi-fréquence synchrone quel que soit le calage.

En conclusion, nous avons établi que, pour une machine donnée, entraînée à une vitesse donnée, et pour un calage donné des balais, la fréquence de l'amorçage était bien déterminée : si la machine s'amorce, cet amorçage aura lieu à la fréquence que nous avons établie.

Digitized by Google

Nous ne connaissons encore aucunement la tension à laquelle la machine va s'amorcer, ni le courant débité. Il convient pour cela de s'adresser à la seconde condition

$$R + R_e = \omega_0 M \sin \alpha.$$

Cette condition est une condition limite, comme on le voit en raisonnant de la façon suivante, qui fait intervenir la saturation :

On construit la courbe de magnétisation de la machine pour la fréquence d'amorçage correspondant à la vitesse et au calage des balais considérés.

On trace d'autre part la droite de résistance totale

$$U = (R + R_e)I$$

le point de fonctionnement est alors à l'intersection de ces deux courbes.

La partie rectiligne de la courbe de magnétisation a pour équation

$$U = \omega L_1 I_m.$$

I_m étant le courant magnétisant ramené au stator. D'autre part, on a la relation :

$$\frac{\omega M I \sin \alpha}{I_m} = \frac{\omega L_1 I}{I}$$

comme il apparaît sur le diagramme du moteur série, lorsque la condition de réactance nulle est satisfaite comme nous le supposons.

Par suite la courbe de magnétisation a pour équation

$$U = \omega M I \sin \alpha,$$

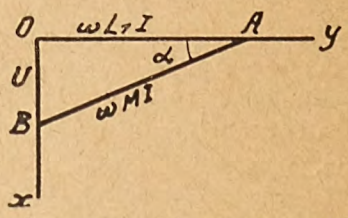


Fig. 6. — Diagramme du moteur série pour la condition de réactance nulle.

et il ne peut y avoir amorçage que si

$$R + R_e < \omega M I \sin \alpha.$$

Cette relation indique dans quelles limites le calage doit être compris pour que la machine puisse s'amorcer.

Applications. — Les conditions précédentes présentent un intérêt particulier lorsqu'on les applique, non pas à la machine série à collec-

Digitized by Google

teur simple, mais à certaines machines polyphasées plus complexes qui fonctionnent à vide comme machine série à collecteur en court-circuit.

Les deux machines les plus intéressantes à ce point de vue sont :

1° Le moteur autocompensé ;

2° Le moteur shunt à double jeu de balais.

Ces machines comportent un bobinage rotorique polyphasé jouant le rôle de primaire et relié par les bagues au réseau. Un collecteur tournant avec le rotor, est relié à un bobinage logé dans les mêmes encoches que le bobinage rotorique principal. Les balais polyphasés du collecteur sont réunis au stator, dans lequel il existe un point neutre.

En l'absence d'alimentation des bagues on obtient bien une machine série polyphasée en court-circuit sur le point neutre statorique.

A. — *Amorçage à vide du moteur auto-compensé* (fig. 7).

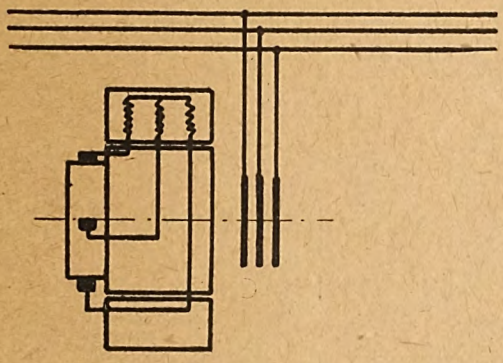


Fig. 7. — Moteur autocompensé.

Nous avons appliqué la théorie précédente à un moteur de 38 ch à 6 pôles, prévu pour être alimenté sous 220 V à 50 p : s.

Dans ce moteur le rapport de transformation $\beta = 0{,}038$ et les coefficients de fuites $U_1 = \mu_2 = 1{,}05$.

La formule générale exprimant la première condition d'amorçage devient :

$$s = \frac{0{,}036 \cos \alpha + 1}{0{,}072 \cos \alpha + 1{,}0014}$$

Pour $\alpha = 30°$

$$s = \frac{1{,}031}{1{,}064} = 0{,}97$$

la fréquence d'amorçage secondaire $f_2 = 1{,}5$.

Digitized by Google

La fréquence primaire est égale à la fréquence de la rotation augmentée de la fréquence secondaire, c'est-à-dire qu'à 1 000 t : mn la fréquence primaire est égale à

$$50 + 1{,}5 = 51{,}5 \text{ p : s.}$$

Pour $\alpha = 90°$

$$s = \frac{1}{1{,}0014} = 0{,}9986$$

$$f_2 = 0{,}07 \qquad f_1 = 50{,}07 \qquad \text{à 1 000 tours.}$$
$$f_1 = 48{,}45$$

Nous voyons que l'amorçage en courant continu se produit pour un angle très voisin de $\frac{\pi}{2}$.

Pour $\alpha = 150°$

$s = 1{,}031$

$f_2 = -1{,}55$ à 1 000 tours.

Le sens de rotation du champ tournant produit par le courant secondaire s'est inversé en passant par la zone d'amorçage en continu et la fréquence est légèrement plus grande pour $\alpha = 30°$ que pour $\alpha = 150°$.

La seconde condition d'amorçage $R < \omega_0 M \sin \alpha$, donne à 1 000 tours

$$0{,}16 < 0{,}58 \sin \alpha,$$

d'où nous tirons

$$164° > \alpha > 16°.$$

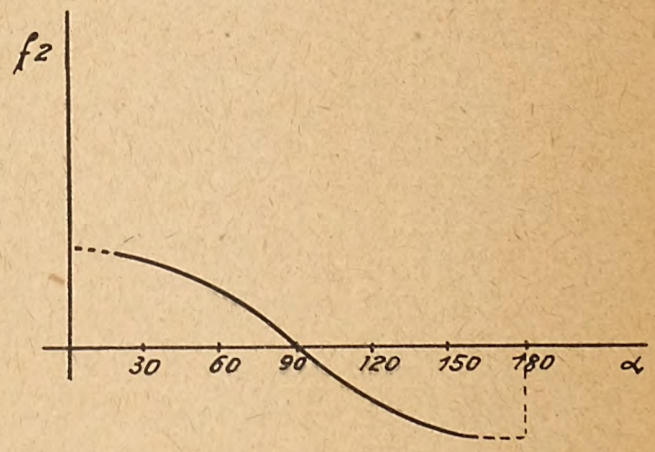


Fig. 8. — Fréquence secondaire en fonction du calage des balais.

La courbe (fig. 8) donne la fréquence secondaire en fonction du calage des balais.

Digitized by Google

La partie continue correspond aux calages qui satisfont simultanément aux deux conditions.

La planche I résume la comparaison entre calculs et essais de la fréquence d'amorçage à vide du moteur précédent.

B. — *Amorçage à vide du moteur shunt à double jeu de balais* (fig. 9).

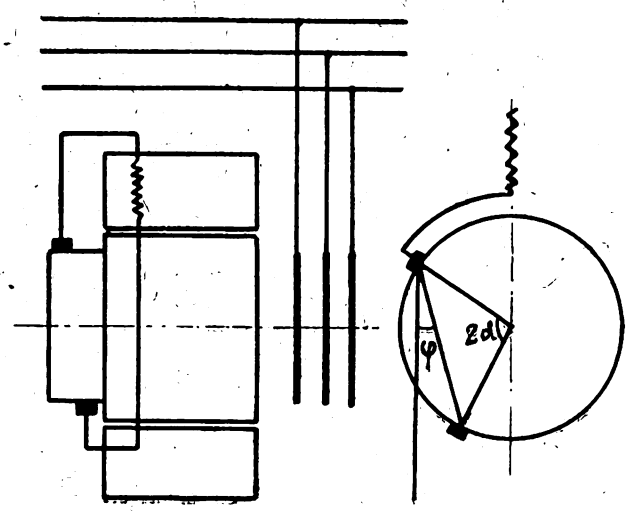


Fig. 9. — Moteur shunt à double jeu de balais.

Le circuit secondaire du moteur shunt à double jeu de balais constitue un moteur série hexaphasé à collecteur en court-circuit.

Nous avons appliqué le calcul précédent à un moteur de 20 ch à 6 pôles à vitesse variable de 500 à 1 500 t : mn, prévu pour être alimenté en moteur sous 220 V à 50 p : s.

Nous n'envisagerons que le cas d'un écart constant des jeux de balais dont on fait varier l'axe d'orientation. On pourrait faire un calcul semblable pour divers écartements des balais.

Nous choisissons l'écart :

$2\alpha = 16°$ ce qui détermine le rapport de transformation;

$\beta = 0{,}13$, les coefficients de fuites $\mu_1 = \mu_2 = 1{,}05$.

La formule générale

$$s = \frac{\frac{\beta}{\mu_1}\cos\varphi + 1}{\beta^2 \frac{\mu_1}{\mu_2} + 2\frac{\beta}{\mu_1}\cos\varphi + 1}$$

devient

$$s = \frac{0{,}124 + \cos\varphi + 1}{1{,}0169 + 0{,}248\cos}$$

Digitized by Google

faisons $\varphi = 30°$

$$s = \frac{1,107}{1,231} = 0,9$$

Si la machine tourne à 900 tours, la fréquence d'amorçage secondaire est égale à :

$$45\ (1 - 0,9) = 4,5$$

et par suite la fréquence primaire

$$45 + 4,5 = 49,5\ ;$$

pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$s = \frac{1}{1,0169} = 0,983$$

et la fréquence primaire $= 50,85$.

pour $\varphi = 150°$ $s = 1,11$

à 1100 tours la fréquence secondaire est égale à

$$55(1 - 1,11) = - 6$$

et la fréquence primaire à

$$55 - 6 = 49 \text{ p : s.}$$

La seconde condition d'amorçage $R < \omega_0 M \sin \alpha$ devient dans ce cas

$$0,03 < 0,099 \sin \alpha \frac{N}{1\,000}$$

N étant la vitesse de rotation en tours par minute.

A 1 000 tours on obtient :

$$18° < \alpha < 162°.$$

La planche II résume la comparaison, entre calculs et essais de la vitesse d'amorçage à fréquence constante.

Remarque. — Dans les deux cas considérés la fréquence secondaire f_2 a été calculée; la fréquence primaire est la fréquence de la rotation, augmentée de la fréquence f_2 prise avec son signe.

Si la fréquence f_2 est faible, ce qui est le cas général, on voit que la machine s'amorcera à une fréquence voisine de celle de la rotation. A vitesse de rotation constante il ne sera pas possible en décalant les balais de conserver une fréquence primaire constante.

c) *Cas plus complexes.*

Lorsqu'on connaît les expressions de l'impédance équivalente à une machine, il est toujours possible d'écrire la condition analytique de

Digitized by Google

l'amorçage; mais les écritures deviennent rapidement compliquées. Dans le cas, simple en apparence, du moteur d'induction avec changeur de fréquence en cascade, le calcul apparaît déjà prohibitif; nous ne jugeons pas utile de le reproduire ici.

Troisième partie. — Caractéristiques en charge en régime amorce.

Le problème intéressant dans la pratique est le suivant : une machine asynchrone étant normalement établie pour fonctionner en moteur sur un réseau de tension U_0 et de fréquence f_0, dans quelles conditions peut-on utiliser cette machine comme génératrice polyphasée autonome, fonctionnant sur un circuit d'utilisation qui lui est propre ?

Si la génératrice est entraînée à vitesse constante, elle débitera à fréquence et tension variables avec la charge (qui devra être définie par les kW et par le $\cos\varphi$).

Si la génératrice est entraînée à vitesse variable suivant une loi particulière, elle pourra débiter à fréquence constante et tension variable avec la charge.

Les conditions précédentes s'entendent pour la caractéristique naturelle obtenue à calage fixe des balais. On peut également envisager le fonctionnement à *vitesse constante* et calage variable pour maintenir la fréquence constante, la tension variant avec la charge.

Nos essais ont porté sur 3 machines différentes :

1° Moteur auto-compensé ;

2° Moteur shunt à double jeu de balais ;

3° Moteur asynchrone avec changeur de fréquence en cascade.

a) Moteur autocompensé. — Les essais en charge sur résistance (charge à $\cos\varphi = 1$) sont représentés PL III à V, le moteur étant entraîné à vitesse constante. Ces courbes donnent la fréquence et la tension aux bornes en fonction du courant débité, pour différents calages des balais repérés à partir d'une origine arbitraire.

b) Moteur shunt à double jeu. — Les essais en charge sur résistance sont représentés PL VI à XI. Les PL VI à IX se rapportent au cas où la machine est entraînée à vitesse constante ; elles donnent la fréquence et la tension en fonction de la charge.

Dans le cas des courbes VI et VII, on a considéré trois calages diffé-

Digitized by Google

rents et entraîné la machine dans chacun des cas à une vitesse telle que l'on obtienne à vide la même fréquence.

Au contraire, dans le cas des courbes VIII et IX, on a entraîné la machine à la même vitesse pour les trois calages.

Les PL X et XI se rapportent au cas où la vitesse a été variée pour maintenir la fréquence constante ; elles donnent la loi de variation de la vitesse et de la tension avec la charge.

Les essais en charge sur moteur d'induction sont représentés PL XII à XVIII et sont classés dans le même ordre que les courbes précédentes. Les décalages sont repérés par l'angle φ et l'écartement des deux jeux de balais par l'angle 2α.

c) Moteur asynchrone avec changeur de fréquence. — Les essais en charge sur résistance sont représentés PL XIX à XXI pour une vitesse d'entraînement constante et pour différents calages fixes des balais.

La vitesse a toujours été choisie pour que la fréquence à vide soit égale à 50 périodes par seconde.

Les PL XXII et XXIII se rapportent au cas où la machine est chargée sur un moteur d'induction; le $\cos\varphi$ varie donc en fonction de la charge suivant une loi particulière.

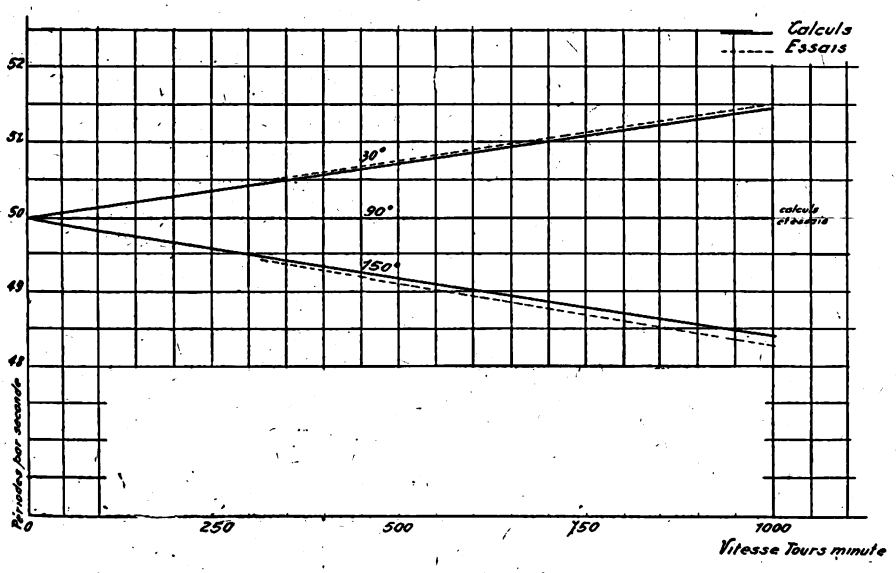
On voit que dans les différents cas considérés un fonctionnement à tension et fréquence quasi constantes et charge variable peut être envisagé sans recourir à l'emploi d'un régulateur automatique; la valeur de la tension et de la fréquence étant fixées par la vitesse d'entraînement (1). Comme nous l'avons remarqué, l'emploi industriel de ces conditions de fonctionnement présente certaines difficultés pratiques, et le calcul de prédétermination en est délicat. Mais ces difficultés pourront être surmontées dans un avenir prochain (2) et les possibilités de fonctionnement indiquées méritaient d'être signalées, car elles intéressent une importante classe de machines.

(1) Des courbes analogues relatives au cas d'un moteur d'induction excité par capacité ont déjà été publiées (Sordina, *loc. cit.*).

(2) Les ateliers de constructions électriques de Jeumont ont actuellement en cours de fabrication plusieurs moteurs asynchrones de ce type, prévus pour fonctionner en génératrice autonome à certaines périodes de l'année.

Digitized by Google

PLANCHE I.



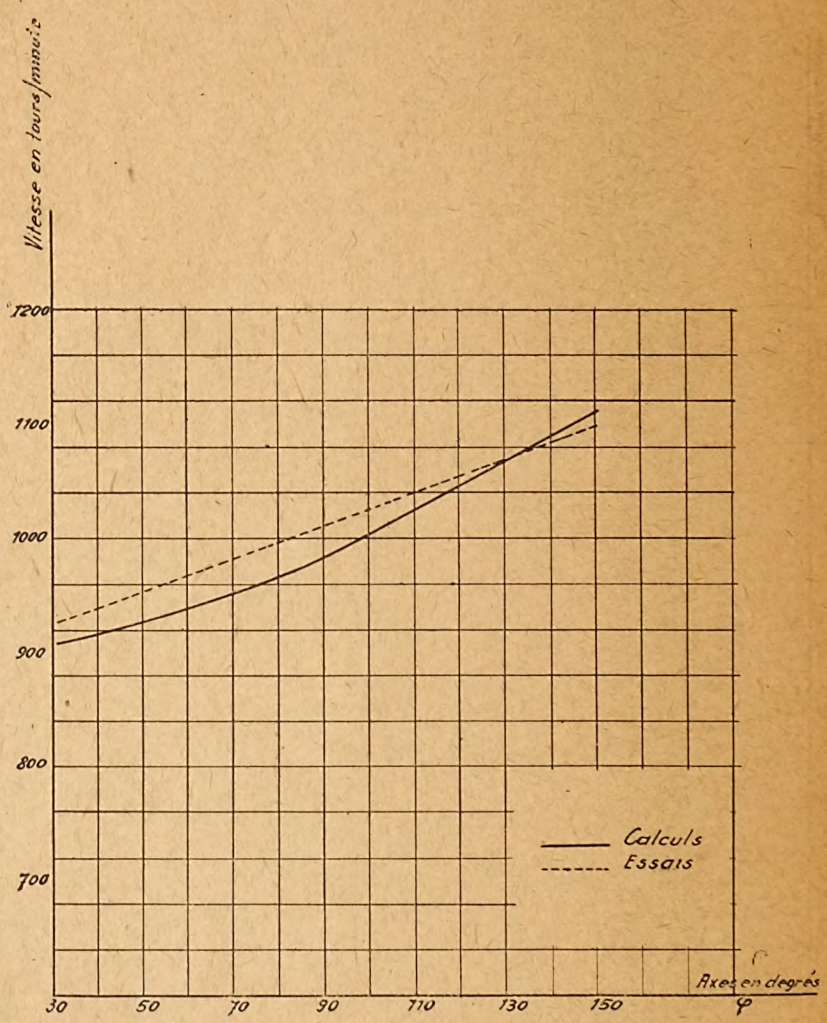
Moteur autocompensé.

Fréquences d'amorçage à vide en fonction de la vitesse pour différents calages des balais.

Résultats des calculs et des essais.

Digitized by Google

PLANCHE II.



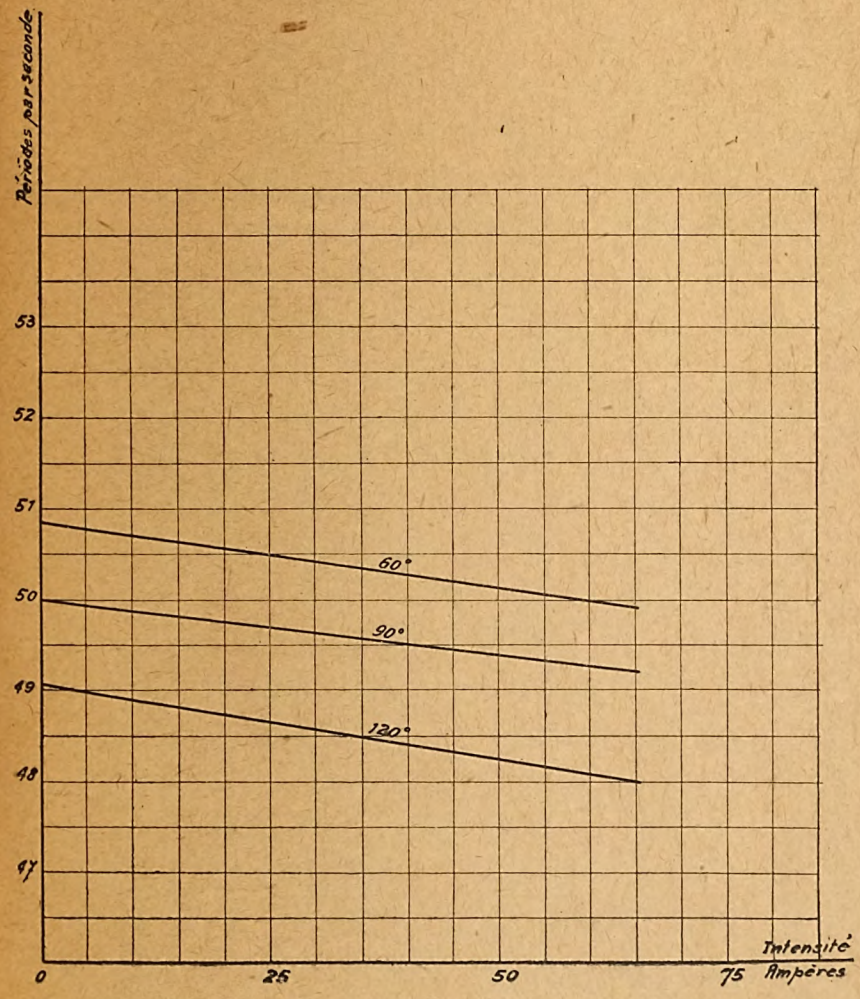
Moteur shunt à double jeu de balais.

Amorçage à vide à fréquence constante (50 p : s).
Vitesse en fonction de l'axe d'orientation des balais (écartement constant) $2\alpha = 16°$.

Résultats des calculs et des essais.

Digitized by Google

PLANCHE III.



Moteur autocompensé.

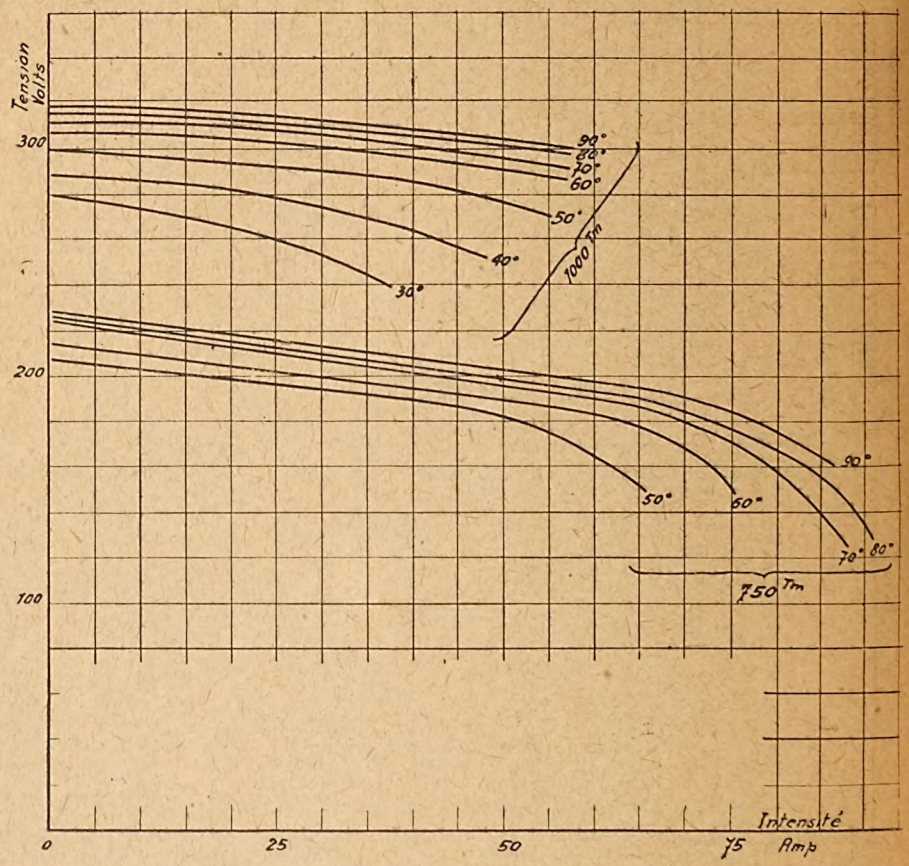
Essais en charge sur résistance.

Fréquence d'amorçage en fonction de l'intensité débitée.

Vitesse : 1000 tours minute.

Digitized by Google

PLANCHE IV.

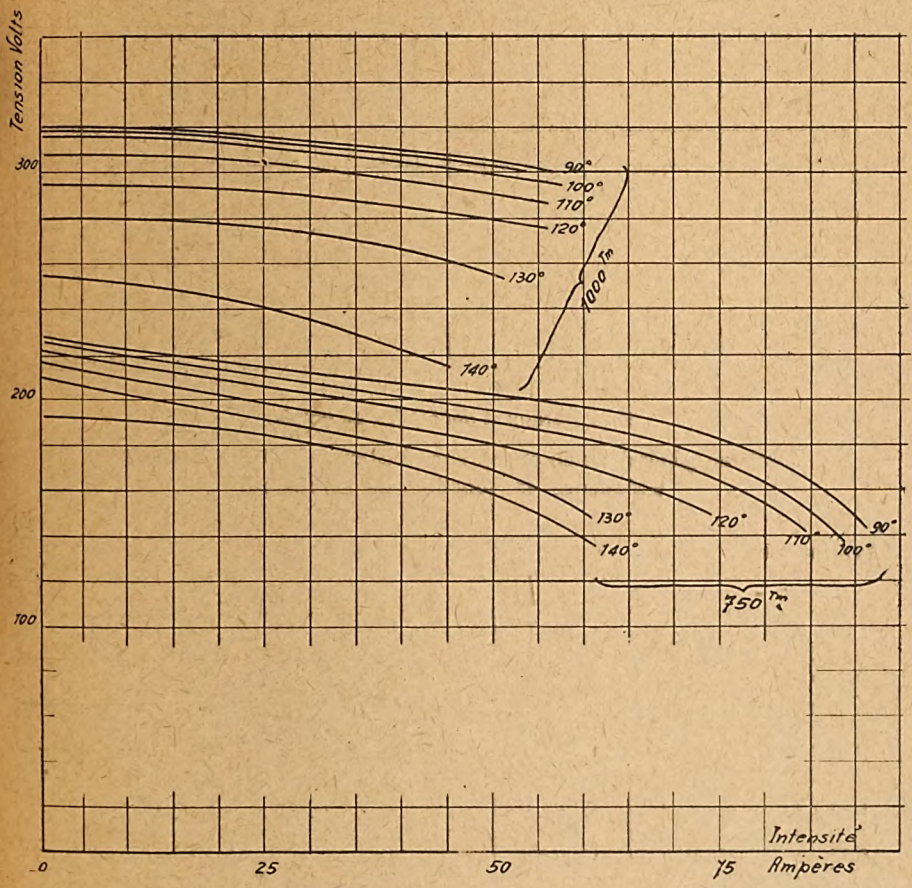


Moteur autocompensé.

Essais en charge sur résistances à 1000 et 750 tours-minute pour différents calages des balais.

Digitized by Google

PLANCHE V.

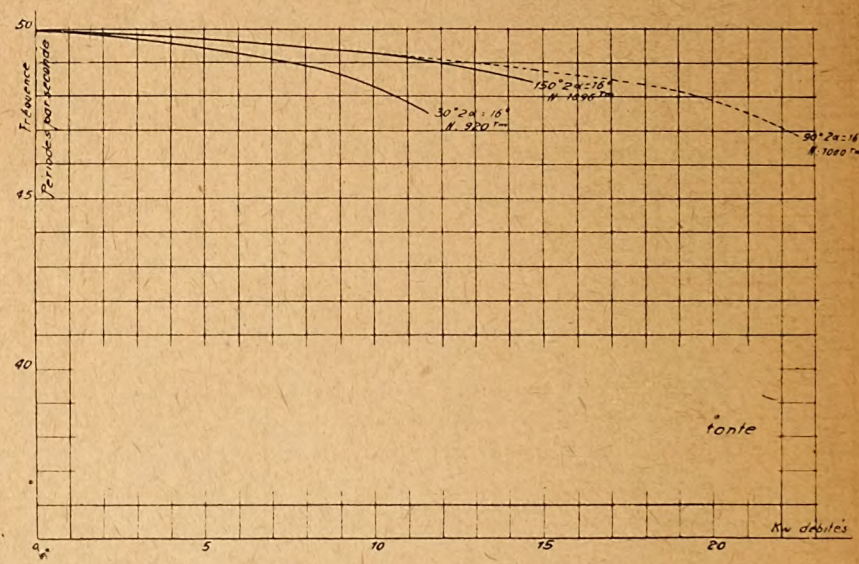


Moteur autocompensé.

Essais en charge sur résistances à 1000 et 750 tours-minute pour différents calages de balais.

Digitized by Google

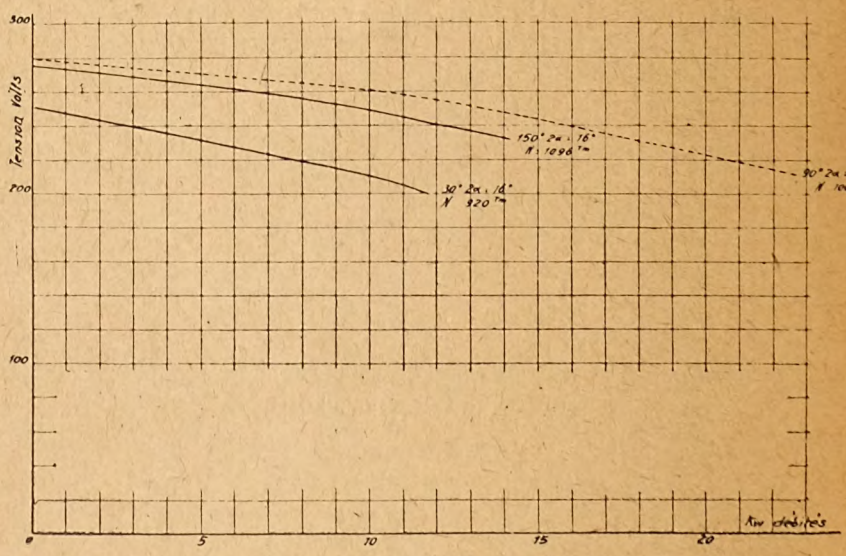
PLANCHE VI.



Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais en génératrice en charge sur résistances à vitesse constante.
Fréquence en fonction de la charge.

PLANCHE VII.



Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais en génératrice en charge sur résistances à vitesse constante.
Tension en fonction de la charge.

Digitized by Google

PLANCHE VIII.

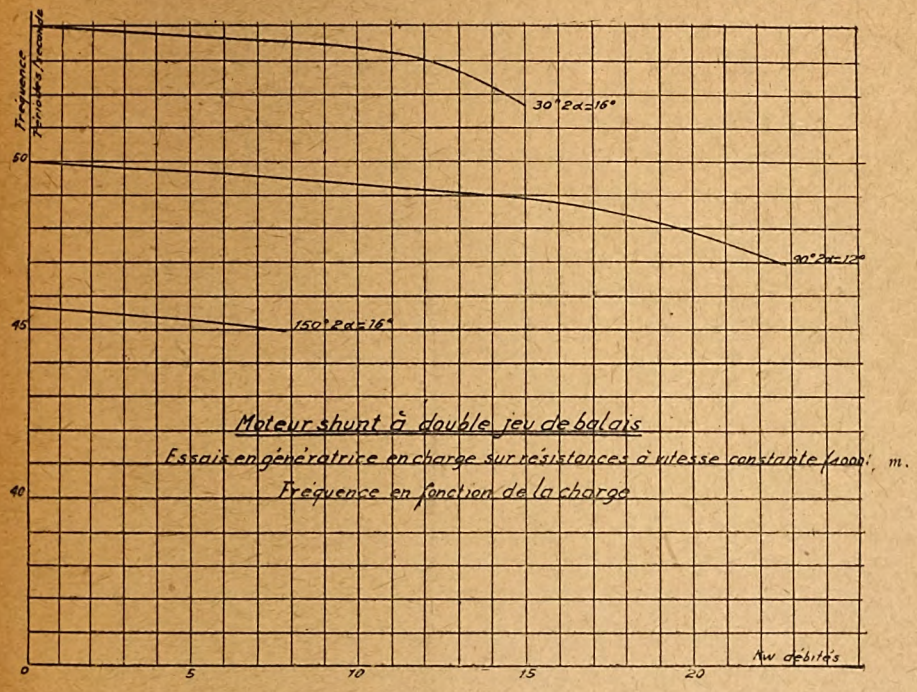
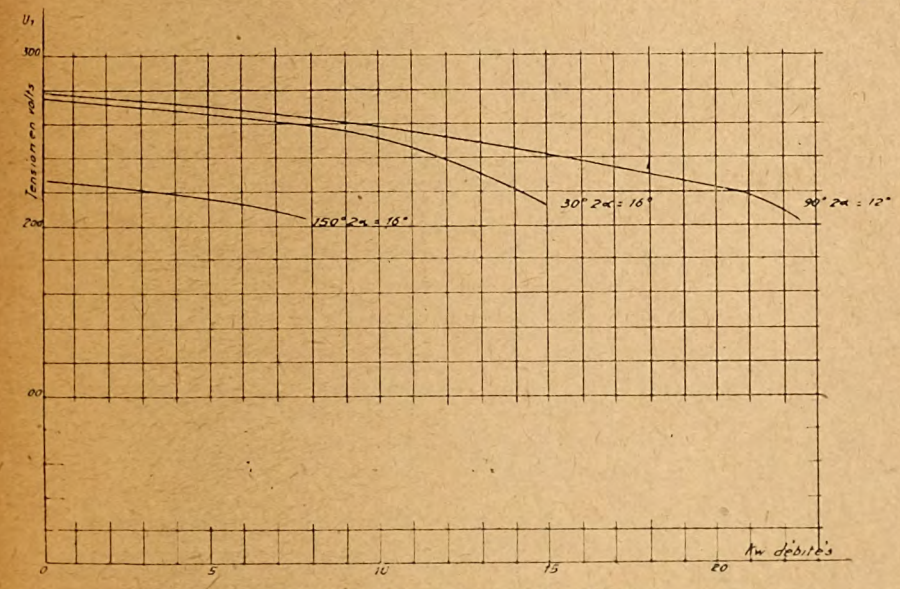


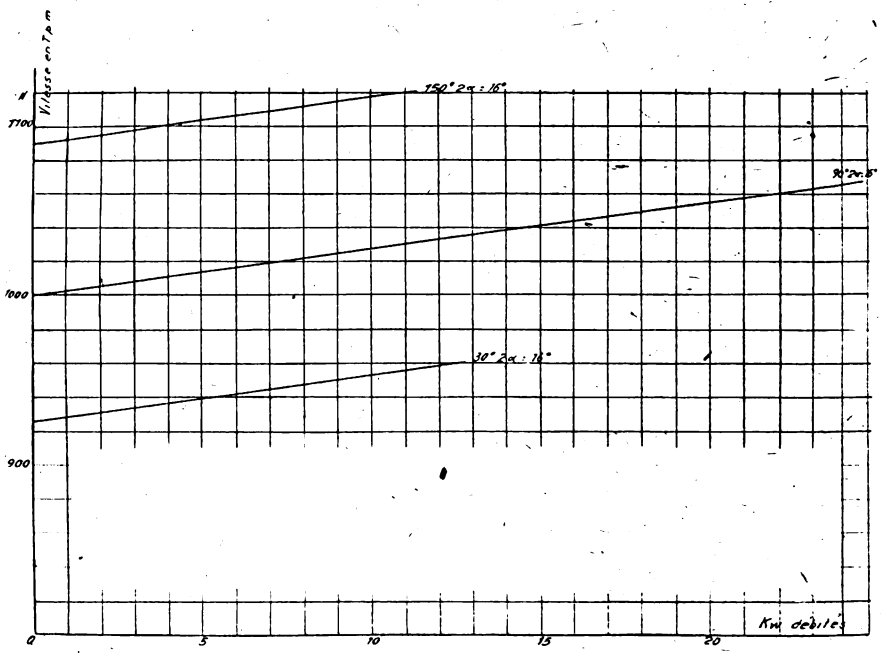
PLANCHE IX.



Moteur shunt à double jeu de balais.
Essais en génératrice en charge sur résistances à vitesse constante (1000 tours minute).
Tension en fonction de la charge.

Digitized by Google

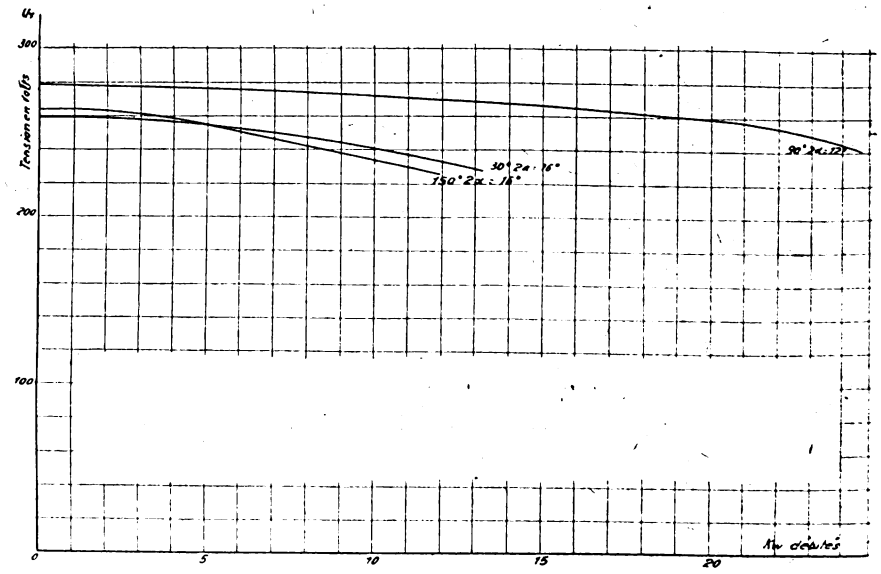
PLANCHE X.



Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais en génératrice en charge sur résistances à fréquence constante (150 p : s).
Vitesse en fonction de la charge.

PLANCHE XI.

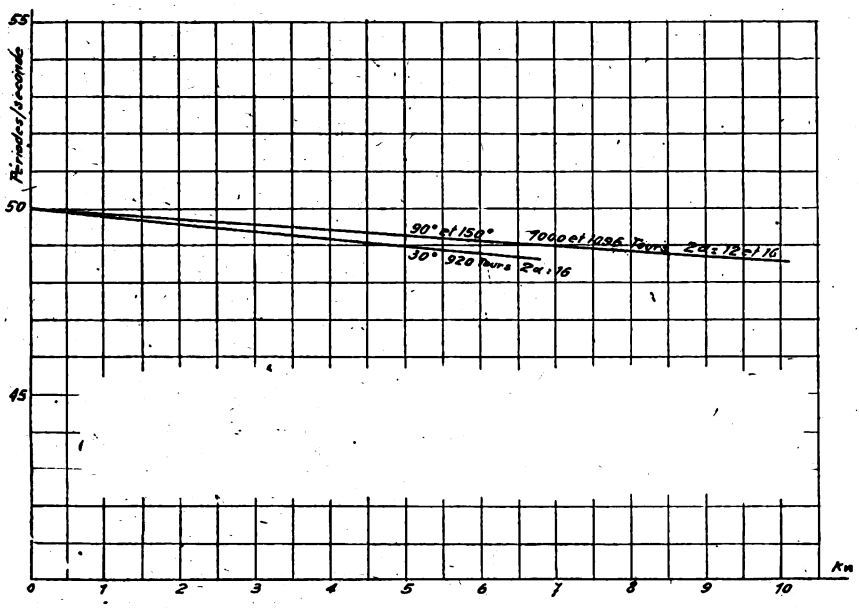


Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais en génératrice en charge sur résistances à fréquence constante (50 p : s).
Tension en fonction de la charge.

Digitized by Google

PLANCHE XII.

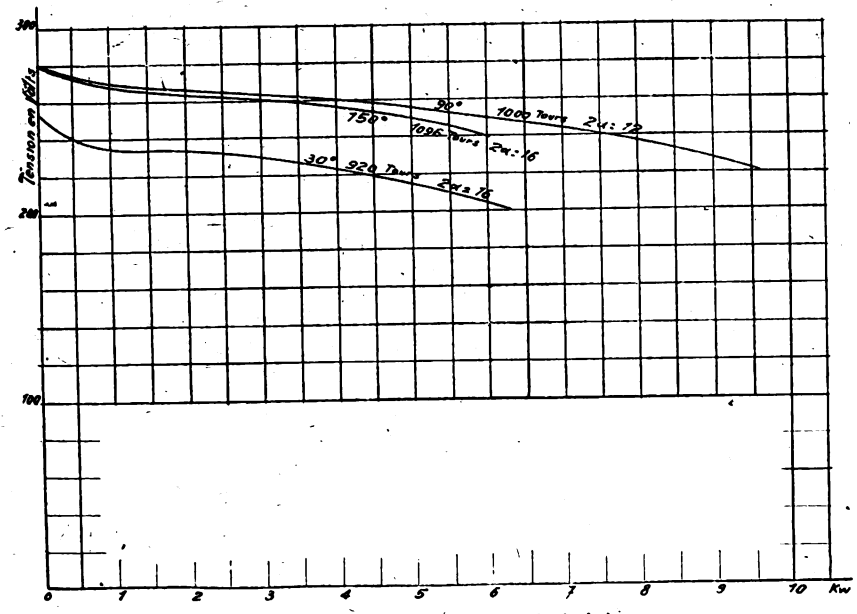


Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais à vitesse constante.

Fréquence en fonction de la charge. Débit sur moteur asynchrone.

PLANCHE XIII.



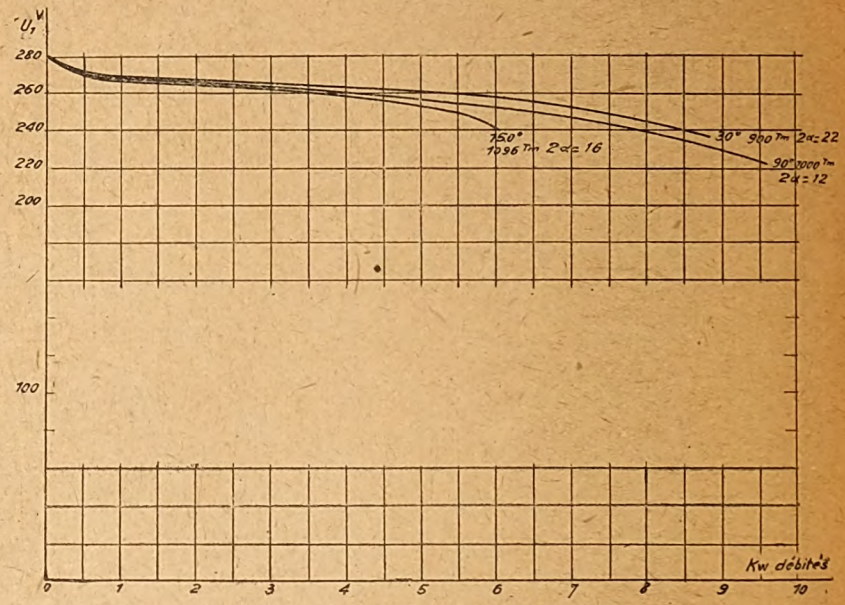
Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais à vitesse constante

Tension en fonction de la charge. Débit sur moteur asynchrone.

Digitized by Google

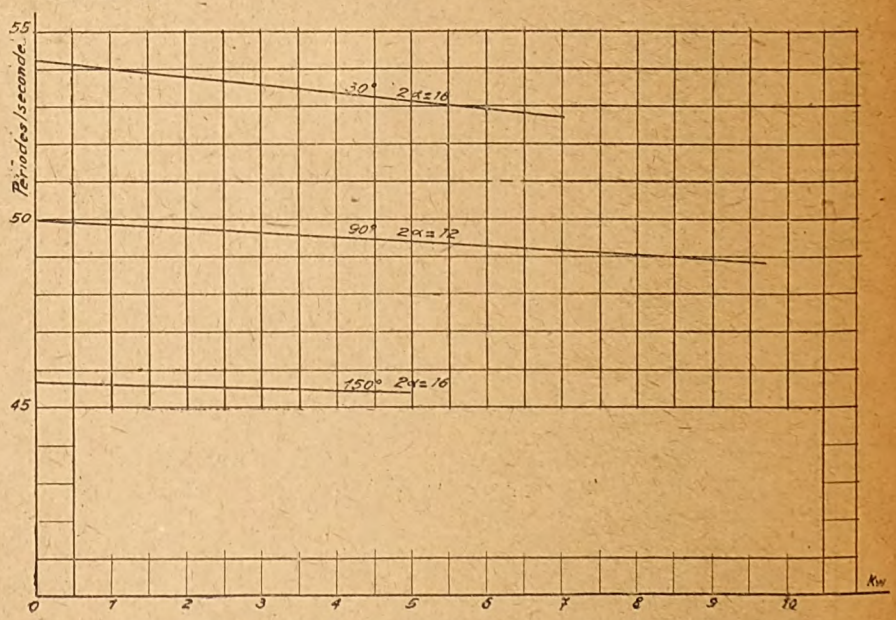
PLANCHE XIV.



Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais en génératrice à vitesse constante (fréquence à vide : 50 p : s).
Débit sur moteur asynchrone.
(L'écartement des jeux de balais a été choisi de telle façon que les tensions à vide soient égales).

PLANCHE XV.

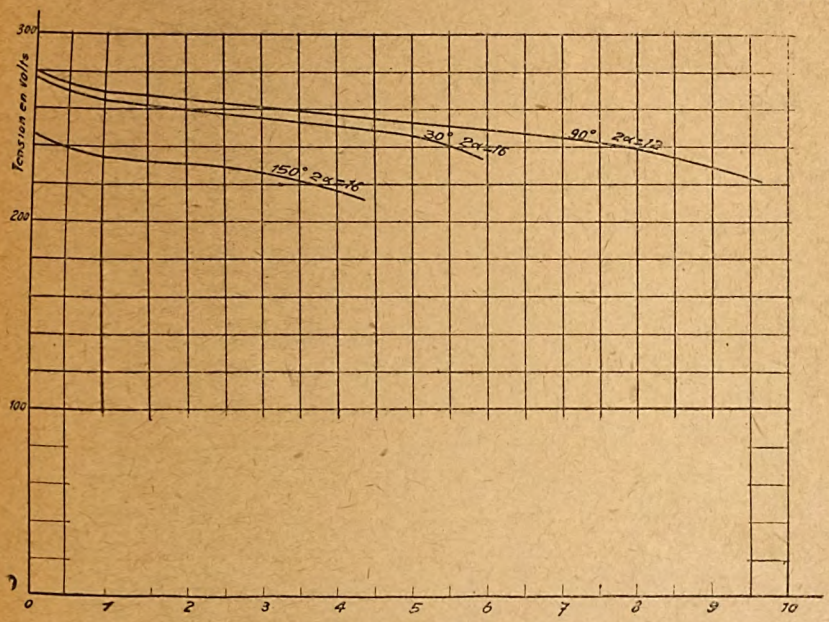


Moteur shunt à double jeu de balai.

Essais à vitesse constante (1000 tours minute).
Fréquence en fonction de la charge. Débit sur moteur asynchrone.

Digitized by Google

PLANCHE XVI.

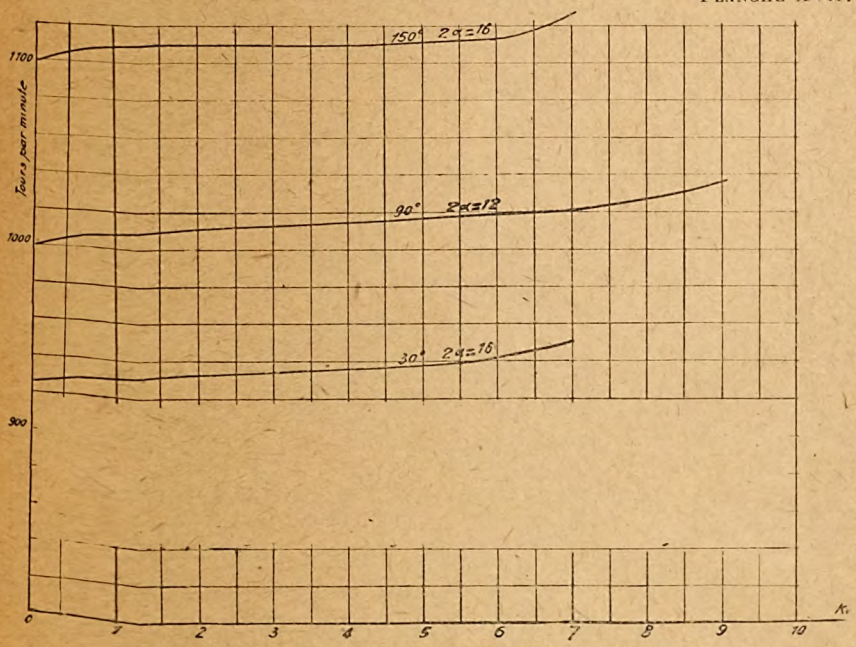


Moteur à double jeu de balais.

Essais à vitesse constante (1000 tours minute).

Tension en fonction de la charge. Débit sur moteur asynchrone.

PLANCHE XVII.



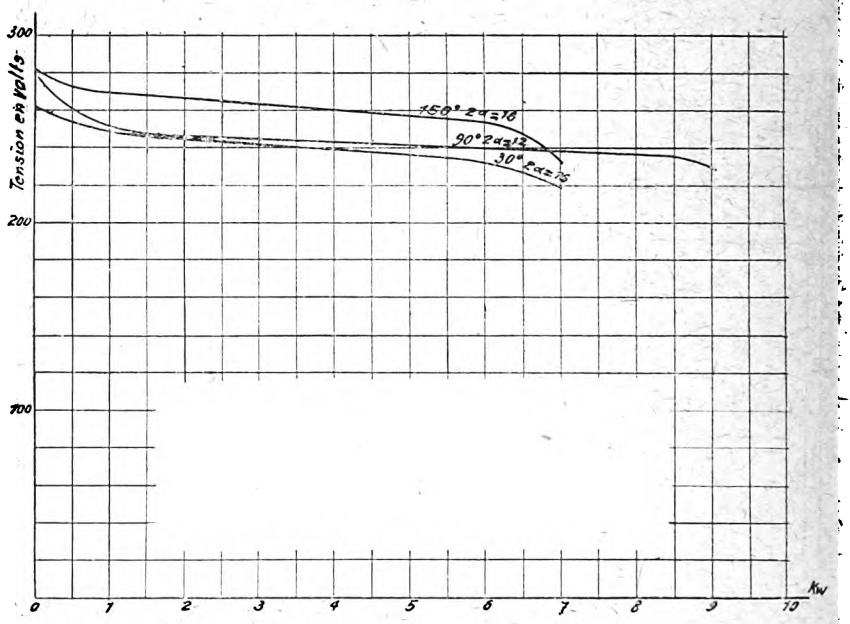
Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais à vitesse constante (50 p : s).

Tension en fonction de la charge. Débit sur moteur asynchrone

Digitized by Google

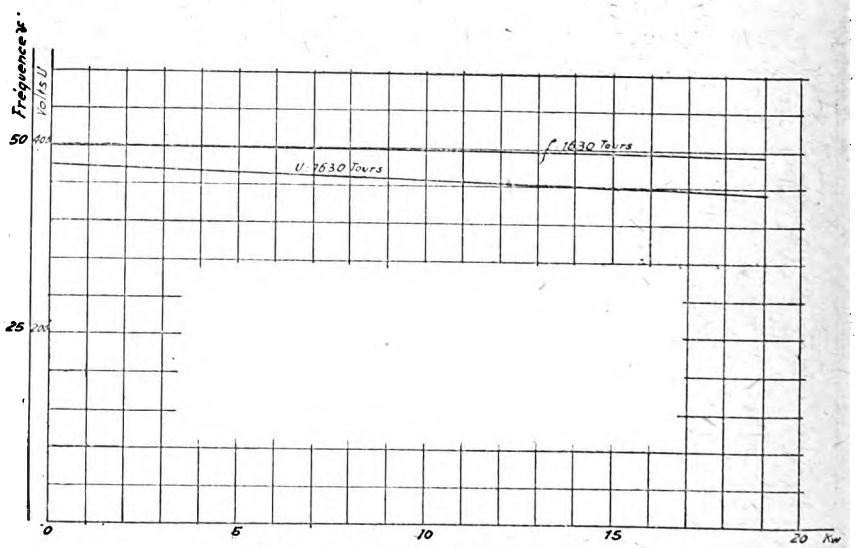
PLANCHE XVIII.



Moteur shunt à double jeu de balais.

Essais à fréquence constante (50 p : s).
Tension en fonction de la charge. Débit sur moteur asynchrone.

PLANCHE XIX.

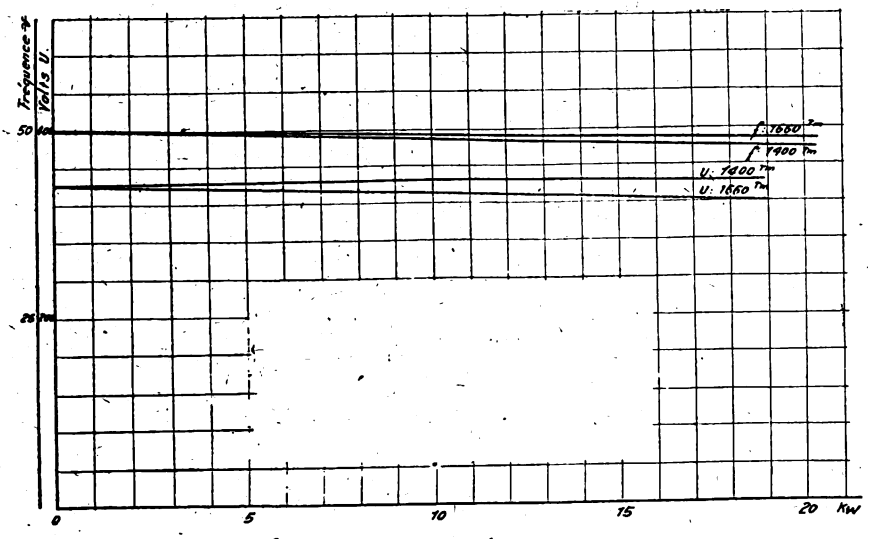


Génératrice asynchrone en cascade.

Vitesse d'entraînement constante. Charge sur résistance.

Digitized by Google

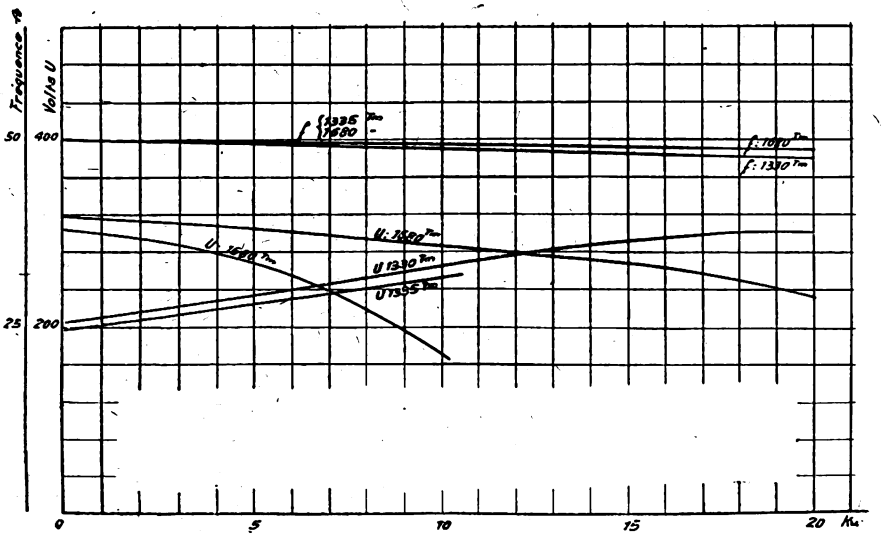
PLANCHE XX.



Génératrice asynchrone en cascade.

Vitesse d'entraînement constante. Charge sur résistance.

PLANCHE XXI.

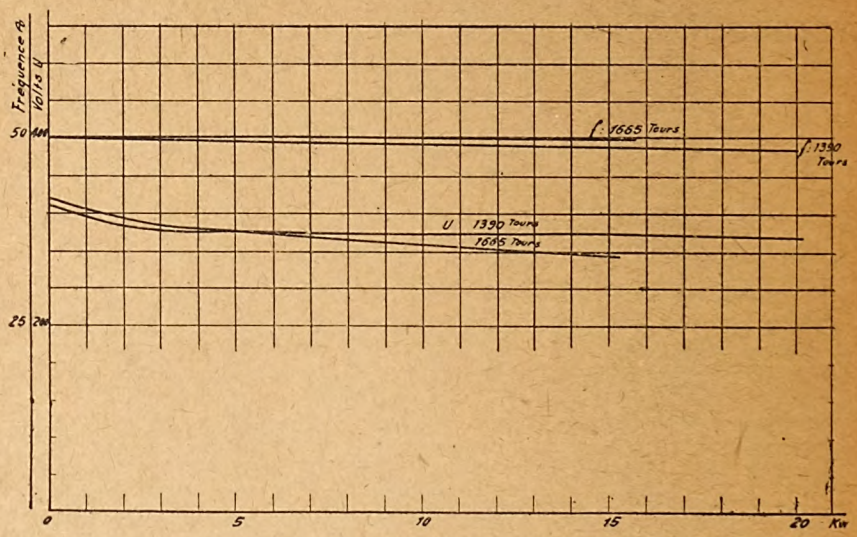


Génératrice asynchrone en cascade.

Vitesse d'entraînement constante. Charge sur résistance.

Digitized by Google

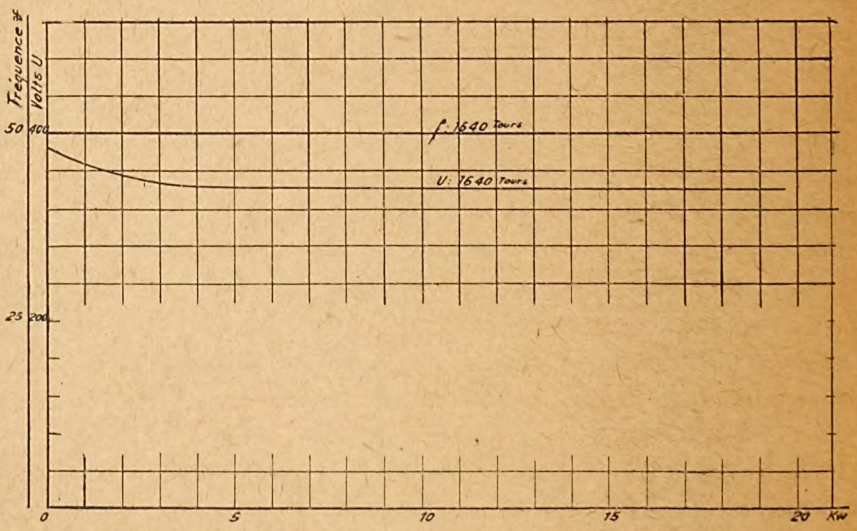
PLANCHE XXII.



Génératrice asynchrone en cascade.

Tension et fréquence en fonction de la charge vitesse d'entraînement constante.
Charge sur moteur asynchrone.

PLANCHE XXIII.



Génératrice asynchrone en cascade.

Tension et fréquence en fonction de la charge vitesse d'entraînement constante.
Charge sur moteur asynchrone.

Digitized by Google

SYSTÈMES DE RÉGLAGE DES FOURS ÉLECTRIQUES A RÉSISTANCE ET A ARCS

par M. Marcel Mathieu,

Ingénieur-Conseil.

A. — *Réglage des fours à résistance. — Thermomètres à air, à toluène pyromètres à dilatation. couples thermoélectriques, relais wattmétriques, régulateurs Thury, pont de Wheatstone, lampes à filament de fer dans l'hydrogène, variation de la tension de dilatation ; divers.*

B. — *Réglage des fours à arcs. — Régulateurs Thury, à contacteurs, Scowill, Tirrill, redresseurs à gaz, commande hydraulique avec relais hydraulique et avec relais électrique.*

Remarques générales. — Sécurité et rapidité de fonctionnement, proportionnalité avec la perturbation, prix de revient, résultats obtenus.

A. — REGLAGE DES FOURS A RESISTANCE

Le réglage d'un four électrique consiste dans les manœuvres nécessaires pour maintenir une température constante dans le four. Le régime étant établi, la température reste presque toujours constante si la puissance fournie au four est constante.

L'action des systèmes de réglages des fours électriques a lieu, sur la puissance fournie, par la variation convenable de la tension d'alimentation ou de l'intensité. Pour obtenir ce résultat, on emploie des appareils qui contrôlent la puissance absorbée à chaque instant ou des appareils qui contrôlent le température dans le four ; ces appareils servent d'indicateurs pour les manœuvres à effectuer ou bien ils commandent plus ou moins directement les servo-moteurs .

Parmi les systèmes de réglage automatique des fours à résistance, on trouve :

1° ceux qui agissent par ruptures ou rétablissements du courant total de chauffage ; c'est-à-dire, ceux qui règlent par « tout ou rien ».

2° ceux qui agissent d'une manière progressive.

Le contrôle de la puissance fournie au four peut se faire directement par l'emploi d'un relais wattmétrique, ou bien par l'emploi de relais ampèremétriques lorsque la tension est constante.

Comme moyen de contrôle de la température, on a utilisé les différents principes des méthodes de pyrométrie, et en particulier :

Digitized by Google

α) la dilatation des fluides (air ou toluène) ;

β) la dilatation des solides ;

γ) le pouvoir thermo-électrique ;

δ) la variation de résistance ohmique avec la température.

La variation progressive de l'intensité s'obtient par la manœuvre d'un rhéostat placé en série avec le four. Ce rhéostat peut être commandé, soit par un moteur spécial, soit par un système régulateur (genre Thury).

L'emploi des lampes à filament de fer dans l'hydrogène, donne une limite automatique de la valeur du courant.

La variation de la tension d'alimentation du four s'obtient par :

α) une action sur le groupe générateur ;

β) l'emploi d'un régulateur d'induction ;

γ) l'emploi de transformateurs à plusieurs rapports ;

δ) l'emploi d'une inductance variable.

Etude des différents systèmes.

Emploi du thermomètre à air.

Le circuit de chauffage comporte un index de mercure mobile dans un tube en U. Une des tubulures du tube en U communique avec le réservoir d'air du thermomètre placé dans le four, l'autre est en communication avec un réservoir d'air extérieur.

Si la précision l'exige, le réservoir extérieur peut être maintenu à une température constante, en le plaçant, par exemple dans de la glace fondante.

Les variations de la température du four produisent des déplacements de l'index de mercure dans le tube en U et ceux-ci provoquent la rupture ou le rétablissement du courant.

J. L. Hangton et D. Hanson [1] ont obtenu à l'aide de ce système une constance de la température à 1°C près.

Le réservoir d'air placé dans le four peut être en métal ou en silice fondue. La limite d'emploi de ce système est la température pour laquelle les réservoirs cessent d'être étanches à l'air et aux gaz chauds.

Emploi du thermomètre à toluène.

Reinders et Hamburger [2] ont utilisé les variations du volume du toluène, pour faire actionner un relais de coupure du courant de chauffage.

(1) *Nat. phys. lab.* (1920) et *Journal de Physique* (1926, page 582 D).

(2) « Fours électriques et Chimie » (Direction de Paul Lebeau), page 70.

Digitized by Google

Le réservoir à toluène était chauffé par une dérivation du courant principal.

Emploi des pyromètres à dilatation.

Les dilatations des solides donnent de faibles déformations et il est toujours nécessaire d'amplifier les écarts entre deux solides, soit par des moyens optiques, soit par des moyens mécaniques.

La simple amplification mécanique, par un système de leviers, conduit à un déplacement pratiquement utilisable.

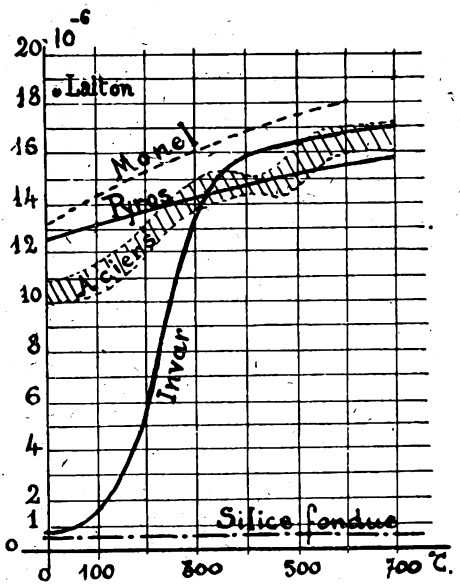


Fig. 1. — Coefficients de dilatation linéaire.

Le choix des matériaux dont on veut utiliser la différence des dilatations linéaires est délicat et il varie suivant les températures à régler et les applications.

D'une façon générale, il est évident qu'il faut choisir des matériaux sans points de transformation aux environs de la température à régler.

Parmi les matières qui peuvent servir comme étalon de faible dilatation il faut citer : l'acier Invar, le métal Pyros, la porcelaine et la silice fondue.

L'acier Invar a un faible coefficient de dilatation entre les températures — 50 à + 150°C. Pour les températures élevées, le coefficient de dilatation de l'Invar est tout à fait semblable à celui des aciers ordinaires (Voir figure 1).

Comme beaucoup d'aciers au nickel, le métal Invar subit une altération profonde au contact de la vapeur d'eau.

Digitized by Google

Le métal Pyros, employé par M. Chevenard, est un alliage de nickel, de chrome et de tungstène. Sa caractéristique est de ne pas posséder de point de transformation et d'avoir une courbe des valeurs du coefficient de dilatation linéaire très régulière et presque rectiligne entre 200 et 1 000°C. (Voir figure 1).

La silice fondue et la porcelaine sont des matières fragiles, mais leur faible dilatation est un grand avantage.

La silice fondue constitue le meilleur étalon de dilatation ; son coefficient de dilatation linéaire est de $0{,}54 \times 10^{-6}$ et il est constant de 0 à 1 000°C.

Les matières à coefficient de dilatation linéaire élevé sont, suivant les applications : l'ébonite, le laiton, le métal Monel, le bronze, le nickel, l'acier calorisé, les aciers au nickel-chrome, le nichrome, le cuivre rouge.

Pour un pyromètre à dilatation devant contrôler la température dans un four à atmosphère oxydante, par exemple, on pourra utiliser un tube en acier calorisé (pour 700°C au maximum) et une tige intérieure en silice. Si la température est 800° ou 900°C l'acier calorisé ne serait pas bien choisi, et le tube en nichrome serait préférable. Toutefois la tige en silice ne devrait pas être en contact avec le nichrome.

Dans les fours à atmosphère réductrice l'emploi du nichrome n'est pas à recommander.

Dans la vapeur d'eau surchauffée, les bronzes et laitons ne donnent pas de bons résultats ; des métaux ont été spécialement étudiés et le métal Monel (cuivre et nickel) est un des alliages donnant les meilleurs résultats.

L'utilisation de la dilatation des deux solides peut se faire de plusieurs manières. Nous décrirons le thermo-relais hydraulique « Arca » qui commande l'interrupteur de chauffage du four (voir le schéma de principe : figure 2).

La canne pyrométrique plonge dans le four, elle est constituée par un tube T (nickel, monel, acier calorisé) et par une tige intérieure *t* (invar, silice, porcelaine).

Le relais hydraulique Arca est essentiellement constitué par un tampon qui vient obturer plus ou moins un ajutage J. Les différences de longueur entre le tube T et la tige *t* sont amplifiées par deux leviers *l* et L (dans le cas du schéma de la figure 2, mais dans certains cas un seul levier est suffisant).

Digitized by Google

Le mouvement ainsi amplifié est transmis au tampon qui ferme ou ouvre la tuyère J.

Le fonctionnement est le suivant :

A la température ordinaire le tampon ferme la tuyère J. L'eau arrive en *a* dans la chambre M, au-dessus d'une membrane souple ; le ressort *r* est alors comprimé sous l'influence de la pression d'eau et l'interrupteur I est fermé ; le courant passe et le four chauffe.

La température s'élève et le tube T se dilate plus que la tige *t*, le

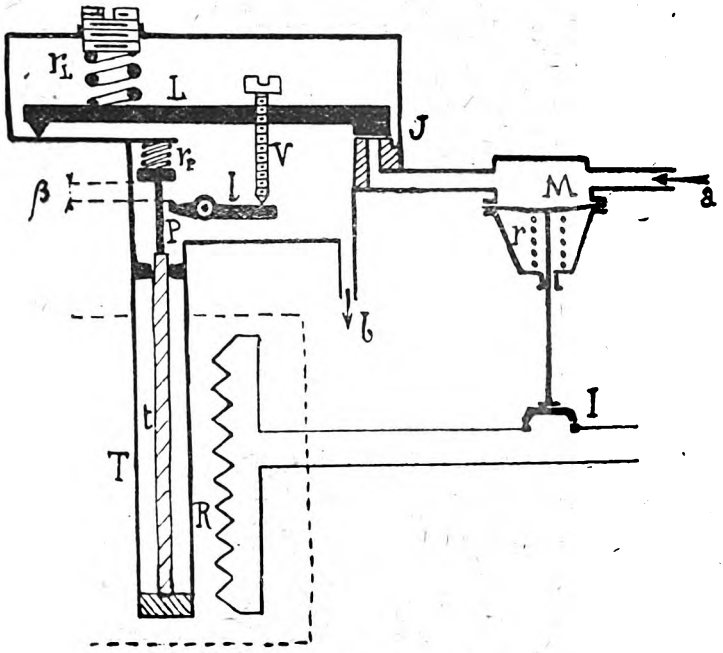


Fig. 2. — Principe du thermo relais hydraulique Arca.

jeu initial β diminue, et il s'annule lorsque la température θ à obtenir est atteinte.

L'interrupteur I restant fermé, la température va dépasser la valeur fixée 0°C, les leviers vont osciller, le tampon va se soulever au-dessus de J. L'eau s'écoulera par J, la pression en M baissera à cause de cet écoulement et le ressort *r* ouvrira l'interrupteur, le courant sera coupé.

Si la température diminue, le fonctionnement est inverse ; le levier L s'abaisse, la tuyère J est fermée, la pression s'établit en M et en comprimant le ressort *r*, l'interrupteur I rétablit le courant dans le four.

Le réglage de la température 0°C est donc automatique.

Digitized by Google

Le jeu initial β est évidemment variable avec la valeur de 0°C; si L_{20} est la longueur utile du tube on a :

$$\beta = L_{20} \times 13{,}5 \times 10^{-6} (0 - 20)$$

β en millimètres à 20°C (tube : nickel ; tige : silice).

La sensibilité d'un tel système est facilement calculable, car il suffit de savoir qu'un déplacement du tampon de 7 centièmes de millimètre peut produire la fermeture ou l'ouverture de l'interrupteur.

L'insensibilité sera de l'ordre de 1°C pour une canne pyrométrique de 400 mm avec une amplification de leviers de 1 à 13 (tube : monel ; tige : silice).

Emploi des couples thermo-électriques.

Les couples thermo-électriques sont très commodes et leur emploi a été réalisé de plusieurs façons.

Le plus simple des dispositifs à couples thermo-électriques consiste dans la mise en place de contacts sur le cadran du galvanomètre. Ces contacts font fonctionner le relais de coupure ou de rétablissement du courant du four lorsque l'aiguille vient toucher le contact spécial.

Une disposition entièrement semblable peut se prendre avec un thermomètre à tension de vapeurs saturantes. Cependant, les couples thermo-électriques sont plus souples et peuvent servir à des réglages différents de température et le maximum de la température de réglage est beaucoup plus élevé puisque les thermomètres à tension de vapeur ne dépassent pas pratiquement 700°C.

On a cherché à perfectionner l'emploi des couples thermo-électriques. On comprend facilement que le point délicat est le contact avec l'aiguille.

On a fait des contacts à bascule commandés par l'aiguille. La rupture se fait par le mercure placé dans un tube en verre (1).

M. de Loisy (1) signale l'emploi d'un galvanomètre à contacts avec une aiguille en verre, avec lame de platine à deux pointes retournées qui se promènent au-dessus de deux canaux de mercure.

Un commutateur abaisse périodiquement l'aiguille et les pointes mettent en relation électrique les deux canaux de mercure. L'un des canaux est muni d'une cloison médiane isolante pour l'inversion du courant qui commande l'alimentation ou le tirage des fours en général.

(1) « Le chauffage industriel moderne » ; « La régulation de la température des fours industriels », par M. E. DE LOISY.

Digitized by Google

Cette disposition intéressante, signalée par M. de Loisy, a le grand avantage de permettre le réglage de plusieurs fours métallurgiques à la fois, à l'aide du même galvanomètre (1).

Le courant qui peut passer dans le contact avec l'aiguille du galvanomètre est évidemment petit et un dispositif intéressant a été cité par M. Oyanna (2) : l'aiguille commande le contact du circuit grille d'un amplificateur. Cet appareil est rapide, très sensible et peut s'appliquer aux températures élevées.

Enfin, il faut signaler le dispositif décrit par B. P. Barfield dans *The Electrician* du 26 novembre 1926, page 614 : L'aiguille porte un petit couple thermo-électrique et en un point donné on a placé, sur le cadran, une bobine chauffante. Lorsque l'aiguille passe au-dessus de cette bobine chauffante il se produit un courant dans le couple de l'aiguille et ce courant fait fonctionner le relais de coupure du courant de chauffage. Lorsque l'aiguille s'écarte à cause du refroidissement, la manœuvre inverse se produit et le courant est rétabli.

Emploi d'un relais wattmétrique.

Certains physiciens (3) ont employé un relais wattmétrique qui coupait le courant à intervalles déterminés et qui le rétablissait automatiquement, de façon à maintenir la puissance fournie constante.

Pour arriver à ce résultat MM. Garvin et Bosano (3) ont employé un compteur portant une roue à contacts et un mouvement d'horlogerie faisant tourner une autre roue à contacts à vitesse constante.

Ils obtiennent ainsi les ouvertures et les fermetures alternées qui permettent de régler la puissance absorbée par le four, même sur un réseau où la tension est très irrégulière (± 18 volts pour une tension nominale de 110 volts). La précision obtenue par MM. Garvin et Basano est de ± 2°C pour 800°C.

Emploi du régulateur genre Thury.

Le courant de chauffage du four que l'on veut régler passe dans une bobine agissant sur un noyau magnétique retenu par un ressort. Si le courant varie, le déplacement du noyau a lieu dans un sens ou dans l'autre, suivant que l'effort d'attraction de la bobine sur le

(1) « Le chauffage industriel moderne » ; « La régulation de la température des fours industriels », par M. E. de Loisy.
(2) *Proc. phys math. Soc. Japan.* (1926) et *Journal de Physique* (1927, page 75 D).
(3) *Bulletin de la Société française de Physique*, n° 219, (19 juin 1925).

Digitized by Google

noyau est supérieur ou inférieur à l'effort de retenue du ressort. Le noyau portant un contact mobile, le courant est lancé dans un sens ou l'autre à un moteur actionnant le curseur du rhéostat placé en série avec le conducteur du four.

Emploi du pont de Wheatstone pour le contrôle de la résistance du conducteur chauffant.

Le conducteur chauffant est placé dans la branche d'un pont de Wheatstone.

Le pont est réglé de façon à ce qu'il soit en équilibre lorsque la température normale, qui correspond à une valeur déterminée de la résistance du conducteur, est atteinte.

Si la température varie, la résistance du conducteur chauffant varie également et le pont n'est plus en équilibre, l'aiguille du galvanomètre vient établir un contact actionnant un relais de commande du moteur du curseur du rhéostat placé sur le circuit.

Le principe précédent a été appliqué de différentes façons : d'abord en courant continu, puis en courant alternatif et enfin dans le but de régler une température variable dans le temps pour certains traitements thermiques. Des dispositifs mus par un mouvement d'horlogerie et par un pyromètre thermo-électrique avec relais, peuvent faire varier les constantes du pont de Wheatstone à chaque instant, pour obtenir la variation de température dans le temps. (Système de MM. Roth et C. Linke) (1).

Emploi des lampes à filaments de fer dans l'hydrogène.

M. H. Weiss place en série avec le conducteur chauffant du four un groupe convenable de lampes à filament de fer dans l'hydrogène.

Ce dispositif permet dans une certaine mesure de limiter le courant automatiquement à cause de la propriété de ces lampes : la différence de potentiel aux bornes d'une lampe passe brusquement de 7 volts à 21 volts si l'intensité varie de 2 ampères à 2,2 ampères. Ces lampes s'emploient avec un régulateur tel qu'un thermomètre à contact et à relais de commande de rhéostat.

Emploi d'un système faisant varier la tension d'alimentation.

Si l'on dispose du groupe générateur, il est facile de régler la ten-

(1) « Les pyromètres à couples thermo-électriques » *Revue générale de l'Electricité* (12 juin 1926) (J. Vassillière Arliac).

Digitized by Google

sion par la vitesse du moteur ou par la variation d'excitation de la génératrice.

Il est évident que l'on peut régler par l'emploi d'un régulateur d'induction commandé à main ou automatiquement.

Ces procédés sont très progressifs et peuvent donner un réglage précis ; cependant, dans certains cas, l'emploi d'un transformateur à plusieurs rapports est très suffisant.

On peut également employer une bobine d'inductance variable. Cette variation s'obtient, suivant les cas, par le réglage d'un entrefer commandé par vis ou par la position d'un noyau magnétique plongeur.

Autres modes de réglage.

Dans certains cas particuliers, il est possible d'utiliser des propriétés spéciales : par exemple, dans les fours à traitements thermiques des aciers, la disparition du magnétisme peut servir de repère (1).

MM. Wild et Barfield ont construit un appareil industriel pratique permettant de déceler la disparition du magnétisme et la Société française « Wild-Barfield » construit des fours à trempe en utilisant cet appareil.

Un système de bobinages (2) permet d'alimenter un détecteur magnétique réglé pour une position normale lorsque la charge du four n'est plus magnétique. Lorsque la charge vient d'être mise au four, elle est magnétique ; l'aiguille dévie donc de sa position normale. Elle y revient lorsque la température est au-dessus du point de transformation, ou de disparition du magnétisme. A ce moment on précipite la charge du four dans le bain de trempe.

Cet appareil permet de répéter indéfiniment le même traitement thermique avec précision.

La nature des fours peut aussi conduire à des réglages spéciaux, par exemple, la variation de pression des anneaux de graphite, l'un sur l'autre, dans un four tubulaire (3), fait varier la résistance et peut contribuer au réglage du four.

Enfin, les dispositifs de disjoncteurs rapides que l'on utilise actuellement dans les machines à souder par résistance, sont des systèmes voisins de ceux que nous étudions ici.

---

(1) L. Grenet : « Trempe, Recuit, Cémentation des Aciers » 1918, p. 221.

(2) Voir « Arts et Métiers » n° 50. Novembre 1924 page 436 : « Application industrielle d'une méthode scientifique pour la trempe des aciers », L. Sauval.

(3) W. Rosenhaim et A. Coad Pryor (*Nat. Phys. Lab.*, 1921).

Digitized by Google

B. — REGLAGE RES FOURS A ARCS

Les procédés de réglage des fours à arcs (ou à électrodes) consistent tous dans la manœuvre des électrodes.

Ils diffèrent l'un de l'autre par la façon d'obtenir ce mouvement.

Le réglage des fours à électrodes est nécessaire pour la bonne utilisation du four, et il est également indispensable pour éviter les grandes variations de courant demandé au réseau.

Dans presque tous les procédés on contrôle l'intensité débitée par une électrode et on cherche à la maintenir constante.

Le principe du fonctionnement est le suivant : lorsque l'intensité dépasse la valeur fixée, la manœuvre consiste à éloigner l'électrode de la masse en fusion et, inversement, lorsque l'intensité est inférieure à la valeur fixée, la manœuvre consiste à rapprocher l'électrode de la masse en fusion.

Pour que ce fonctionnement soit efficace, il faut évidemment que l'intensité débitée diminue lorsque la résistance intérieure du four croît et inversement ; c'est-à-dire qu'il faut que le facteur de puissance du four soit supérieur à 0,707 (1) théoriquement, et pratiquement, qu'il ne soit pas inférieur à 0,75 (2).

Le problème du réglage automatique des fours à électrodes a été résolu de plusieurs façons.

On trouve deux catégories distinctes :

les systèmes utilisant un moteur électrique pour obtenir les mouvements des électrodes, et les systèmes utilisant le cylindre hydraulique.

Le tableau suivant donne une classification des différents systèmes :

Moteur électrique d'électrode	simplement réversible, commandé par régulateur Thury ;
	simplement réversible, commandé par relais et contacteurs ;
	à deux bobinages d'excitation, commandé par contacteurs Scowill ;
	alimenté par groupe Léonard à génératrice ;
	à deux bobinages d'excitation ;
	commande par Tirrill ;
	commande par redresseurs.
Cylindre hydraulique	distribution obtenue par relais hydraulique ;
	distribution obtenue par relais électrique.

(1) Voir « Le Bilan des Fours électriques », A. Levasseur (*Bulletin de la Société française des électriciens*, n° 48, août 1925).

(2) Voir « Le Facteur de puissance des Fours », par L. Bengeon (*Bulletin de la Société française des électriciens*, octobre 1925).

Digitized by Google

Etude des différents systèmes.

Système avec régulateur Thury.

Le moteur commandant l'électrode, moteur de treuil, est un moteur triphasé M*t* (voir figure 3). Le changement de sens de rotation est obtenu par l'inversion de deux phases à l'aide des contacts en charbon du régulateur Thury.

Le moteur de treuil à induit en court-circuit est construit spéciale-

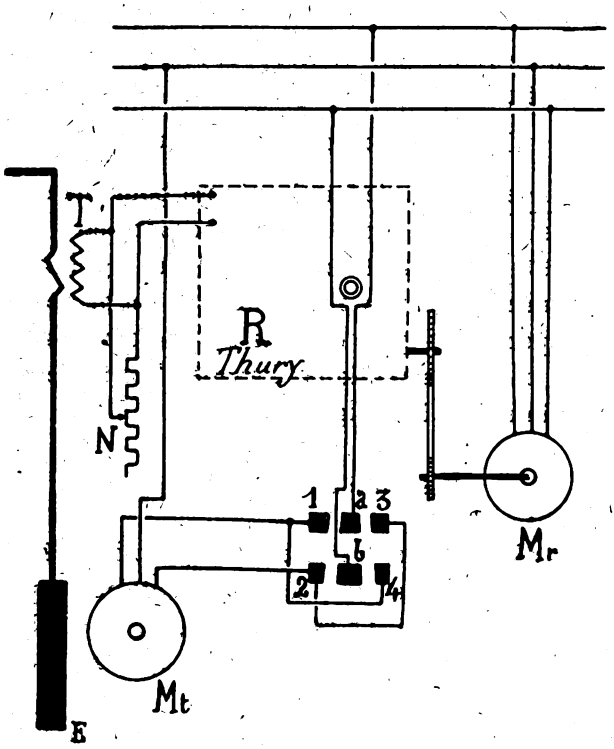


Fig. 3. — Régulateur d'électrode, système Thury.

ment pour la marche automatique, il est muni d'un frein à bain d'huile qui provoque un arrêt brusque et permet de rendre égal le parcours de l'électrode dans les deux sens, le courant aussitôt coupé.

Le contrôle du courant de l'électrode E se fait par l'intermédiaire du transformateur d'intensité T qui alimente la bobine du régulateur R. Suivant les valeurs de ce courant, le bras mobile actionné par le régulateur vient mettre les charbons *a* et *b* en contact avec 1 et 2 ou avec 3 et 4 et le moteur M*t* tourne dans un sens ou dans l'autre.

Le rapport de réduction est tel que l'électrode possède une vitesse

Digitized by Google

de 60 à 70 centimètres par minute lorsque le moteur tourne constamment. Cette réduction est obtenue par vis tangente irréversible.

La résistance N permet le réglage pour une intensité déterminée.

Ce système nécessite évidemment le moteur M*r*, moteur spécial des régulateurs R (1/10 ch).

Dans toutes les installations on place un contrôleur qui permet de passer de la commande automatique à la commande à main.

Le dispositif d'asservissement des régulateurs Thury est appliqué aux régulateurs d'électrodes, afin d'éviter tout amorçage d'oscillations.

Le degré d'insensibilité du système Thury pour réglage de l'intensité d'une électrode est de $\pm$ 4 pour cent.

Cas des fours de faible capacité.

Lorsque le four est petit, l'effort à vaincre pour manœuvrer l'électrode est faible et le treuil et son moteur peuvent être supprimés.

Un tambour est alors monté sur l'arbre du régulateur Thury ou bien reçoit par un réducteur le mouvement de cet arbre, et l'électrode est commandée par câble qui s'enroule sur ce tambour.

Cette disposition peut s'appliquer lorsque l'électrode moufflée une fois a un poids inférieur à 50 kg.

Systèmes à contacteurs.

On conçoit facilement un système de régulation d'électrodes avec un relais ampèremétrique et une série de contacteurs pour la commande du moteur de treuil. La réalisation d'un tel système n'est pas aussi facile et la construction demande une grande précision et un grand soin.

Les grandes maisons de constructions électriques ont toutes réalisé de tels systèmes.

L'Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft a établi un régulateur d'électrodes où le courant secondaire du transformateur d'intensité fait manœuvrer un relais qui commande les contacteurs de montée ou de descente du moteur (1). Des dispositions spéciales sont particulièrement étudiées : en haut de course du contrepoids d'équilibrage de l'électrode, un interrupteur vient couper le courant de façon à arrêter le moteur de treuil ; un relais de tension commande la montée des

(1) Voir le schéma dans la brochure de l'A. E. G. : « Elektrizität im Eisenhüttenwerk », page 198.

Digitized by Google

électrodes en cas de manque de courant ; enfin, deux inverseurs unipolaires servent pour la commande à la main du moteur de treuil.

Dans le système Siemens, le transformateur d'intensité alimente un relais dont le noyau peut agir sur deux contacts. Suivant la position de ce noyau, deux autres relais secondaires peuvent être actionnés et produisent l'inversion du courant alimentant le moteur de treuil.

Une particularité du système Siemens consiste dans le fait que les trois électrodes d'un four triphasé ne peuvent pas être commandées en même temps. Ce résultat est obtenu à l'aide d'un commutateur tournant à une vitesse déterminée.

Une installation du système Siemens (1), comporte un contrôleur qui permet de faire la commande à main et de passer à la commande automatique.

Système Scovill.

Le système Scovill (Brevet Anglais Scovill Manufacturing 140 789) est un système à contacteurs qui commande des moteurs d'électrodes à deux enroulements d'excitation montés en opposition.

Le régulateur est une véritable balance électrodynamique.

Les contacts mobiles sont placés sur un bras horizontal qui porte à chaque extrémité une bobine se déplaçant entre deux bobines fixes.

Le schéma est semblable à celui d'une balance de Lord Kelvin.

Le couplage des bobines fixes et mobiles permet le contrôle de la puissance absorbée par une électrode.

Système avec régulateur Tirrill.

Dans le système avec régulateur Tirrill, le moteur M*t* commandant le treuil de l'électrode est alimenté par un groupe moteur-générateur. (Voir figure 4).

La génératrice G possède deux enroulements d'excitation *a* et *b*. L'enroulement *a* est constamment alimenté par le courant débité par une excitatrice D. L'enroulement *b*, qui agit en sens inverse de *a* est alimenté par un courant qui varie suivant que le régulateur Tirrill R court-circuite ou décourt-circuite la résistance r_2 placée sur son circuit.

Le régulateur agit sous l'influence des variations du courant de

(1) Voir le schéma donné par KERPELY dans « Centralblatt der Hütten und Walzwerke » du 12 mai 1926.

Digitized by Google

l'électrode E qui sont transmises par l'intermédiaire du transformateur d'intensité T.

Suivant la valeur de l'excitation résultante, le courant débité par la génératrice G, et envoyé au moteur M*t* est nul, dans un sens ou dans l'autre ; il en résulte l'arrêt, la montée ou la descente de l'électrode.

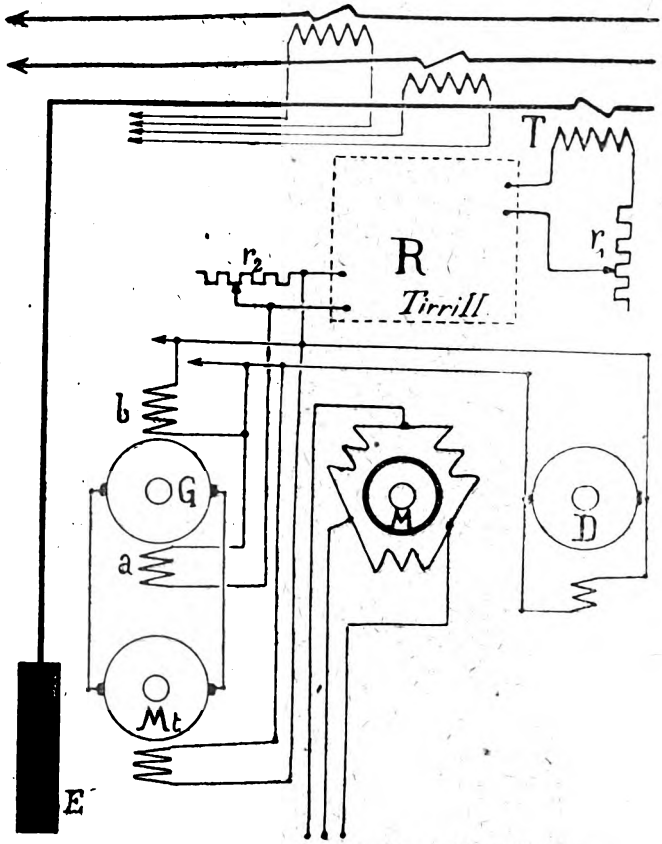


Fig. 4. — Régulateur d'électrode, système Tirrill.

La génératrice G de courant des moteurs d'électrodes M*t* et la dynamo d'excitation D sont commandées par le même moteur M.

Système à redresseurs à gaz.

La General Electric Company qui construit des systèmes de régulation d'électrodes à relais ampèremétriques et à contacteurs, construit également un système très ingénieux qui utilise les redresseurs à gaz (1) *Tungar*.

(1) Voir « Les Phénomènes thermioniques » E. Bloch. (Conférences-Rapports de documentation sur la physique).

Digitized by Google

Dans ce système tous les contacts sont supprimés.

Le moteur de treuil *m* (voir figure 5) est alimenté par un groupe moteur-générateur dont la génératrice G possède deux enroulements d'excitation en opposition, comme dans les systèmes Tirrill.

La valeur du courant d'excitation *a* est variable avec le courant débité par l'électrode. En effet, le courant du transformateur d'intensité est redressé par une lampe Tungar.

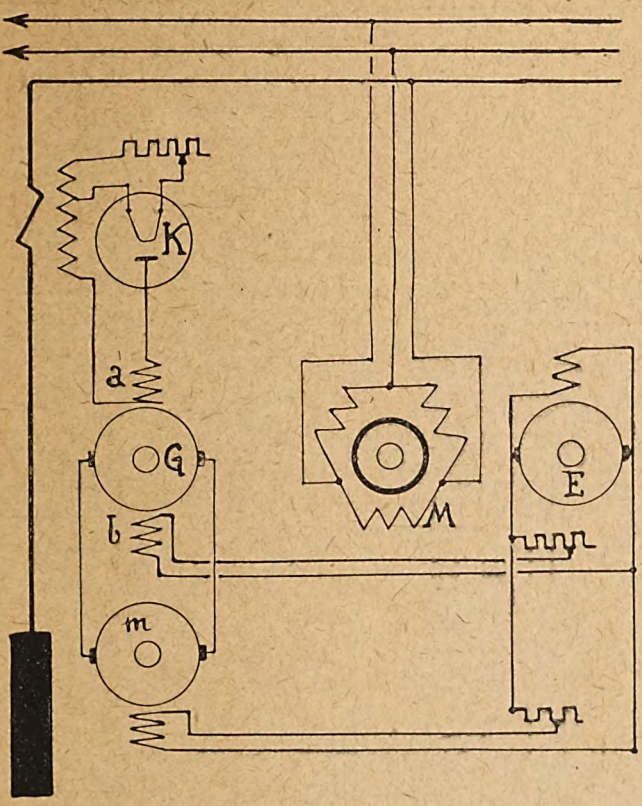


Fig. 5 — Régulateur d'électrode, système G. E. C° à redresseur.

Les variations du courant d'électrode, entraînent donc, sans retard, des variations du courant d'excitation *a* et le courant débité par la génératrice G fait tourner le moteur *m* dans le sens convenable.

L'excitation fixe *b* et celle des moteurs *m* sont fournies par la génératrice E.

M est le moteur qui entraîne les génératrices G et E.

La Société d'Etudes et de Constructions Métallurgiques (S.E.C.O.M.E.T), utilise également le système à redresseurs ; mais elle place un redresseur de la tension entre l'électrode et la masse, de façon

Digitized by Google

à produire la montée impérative de l'électrode, lorsque cette tension s'abaisse au delà d'un minimum déterminé.

Système de commande hydraulique avec relais hydraulique.

L'électrode est commandée par un cylindre hydraulique à double effet ou à simple effet.

Lorsque le cylindre est à simple effet, l'un des mouvements est

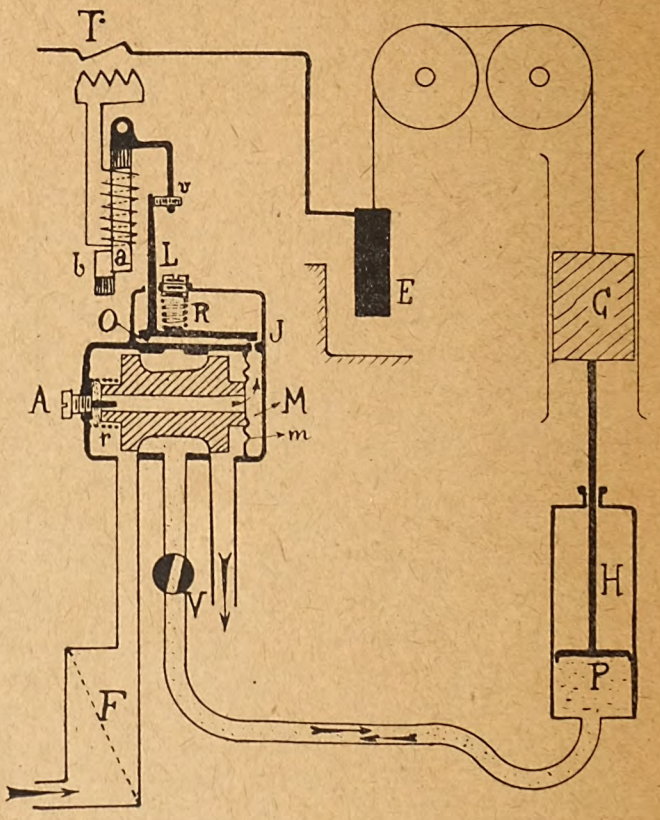


Fig. 6. — Régulateur d'électrode, système Arca.

obtenu par l'action de la pression de l'eau sur le piston et l'autre par l'action d'un contrepoids prépondérant qui produit en même temps la vidange du cylindre. L'admission ou la vidange d'eau au cylindre est obtenue par le jeu d'un tiroir distributeur.

Le distributeur peut être commandé par un relais hydraulique ou par un relais électrique.

Parmi les systèmes à relais hydraulique le plus connu est le système employant le régulateur Arca.

Digitized by Google

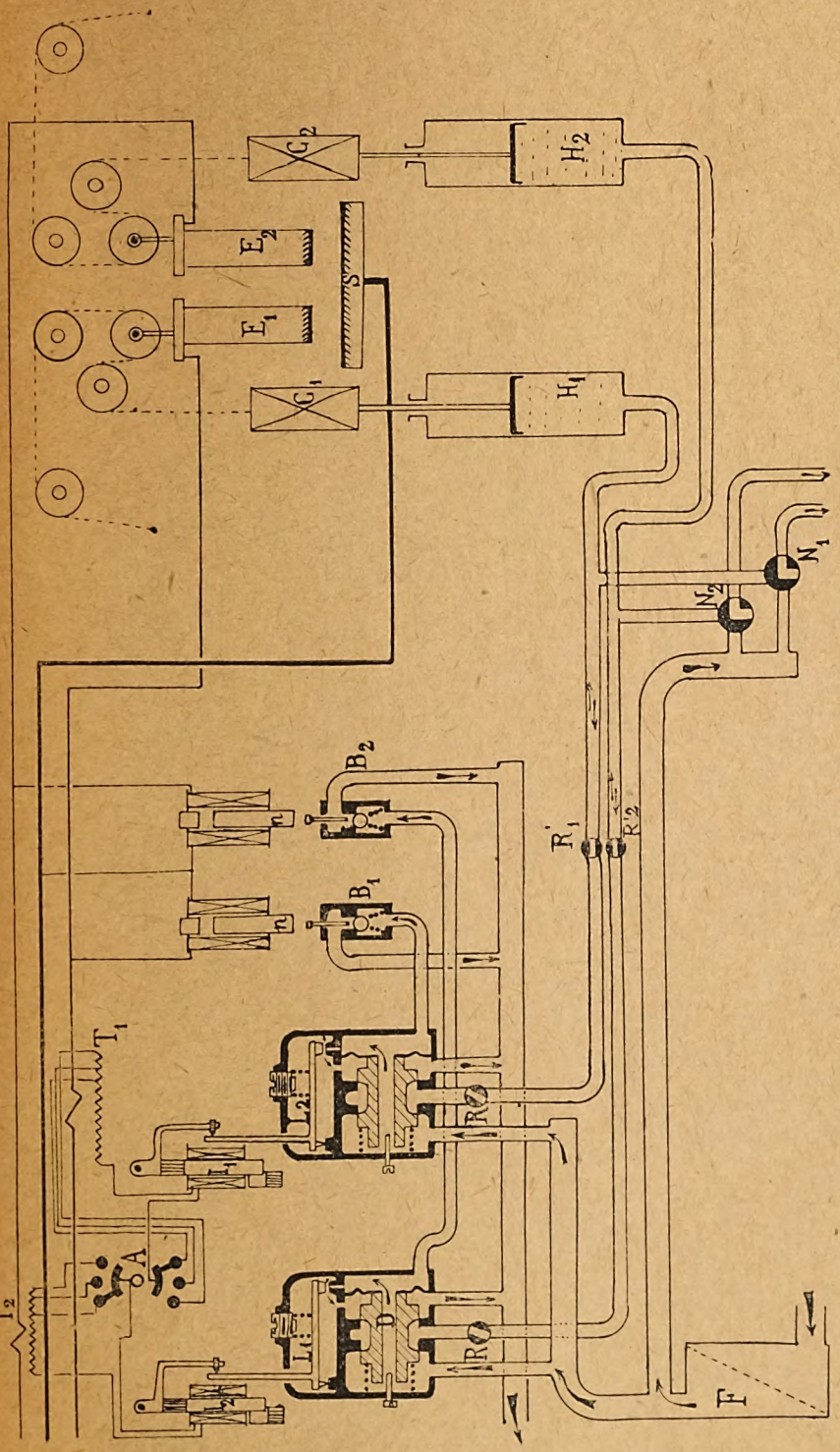


Fig. 7. — Schéma d'installation de régulateurs d'électrodes pour four diphasé (système Arca).

Digitized by Google

La figure 6 donne une combinaison schématique du système Arca.

Le distributeur D est soumis à l'action du ressort r d'une part et à celle de la pression d'eau sur la membrane souple m d'autre part.

Les variations d'intensité débitée par l'électrode E produisent des attractions différentes entre b et a, armatures fixe et mobile de l'électro-aimant. Les déplacements mécaniques dus aux variations de courant, sont transmis au levier L et l'orifice J est plus ou moins obturé, par le tampon solidaire du levier L.

Ainsi, si le courant dépasse sa valeur normale, le levier L oscillant autour de O ouvre l'orifice J et l'eau qui passe dans le conduit axial du distributeur, puis dans la chambre M peut s'écouler plus librement ; il en résulte une chute de pression en M.

L'effort du ressort r devient prépondérant et le distributeur se déplace vers la droite. Ce déplacement met le cylindre à l'évacuation.

Le contrepoids C entraîne alors l'électrode, qui remonte pendant que le cylindre se vide.

L'électrode s'éloignant de la masse, il en résulte une augmentation de résistance qui fera revenir la valeur de l'intensité à sa valeur normale.

Si l'intensité vient à baisser, l'inverse se produit, le cylindre est mis à l'admission et l'électrode descend.

La vitesse du piston est facilement réglable par le robinet V. Le relais hydraulique Arca peut fonctionner avec des pressions d'eau de 1 à 6 kg par cm^2. L'aiguille A placée à l'entrée du conduit axial dans le distributeur pour alimenter la chambre M, a une section variable avec la pression d'eau employée ; on lui donne un diamètre tel que l'écoulement libre par l'ajutage J, forme un jet de 10 à 30 mm de hauteur.

La figure 7 donne un schéma d'installation de régulateurs d'électrodes Arca pour un four diphasé. La caractéristique de ce schéma est le rôle des relais de tension :

Si la tension entre une électrode de E_1 et la masse vient à baisser considérablement, le noyau n, qui est normalement attiré, tombe et ouvre la soupape à bille B_1 ; il se produit une dépression importante dans la chambre du distributeur du cylindre correspondant à E_1 et cette dépression fait agir le système comme dans le cas d'une surintensité et l'électrode E_1 remonte. Cette action est pratiquement instantanée.

Le schéma de la figure 8, montre le système Arca appliqué à un four à trois électrodes. Le rôle du relais de tension B est différent de ceux du schéma de la figure 7. Il sert en cas de disjonction : le noyau n

Digitized by Google

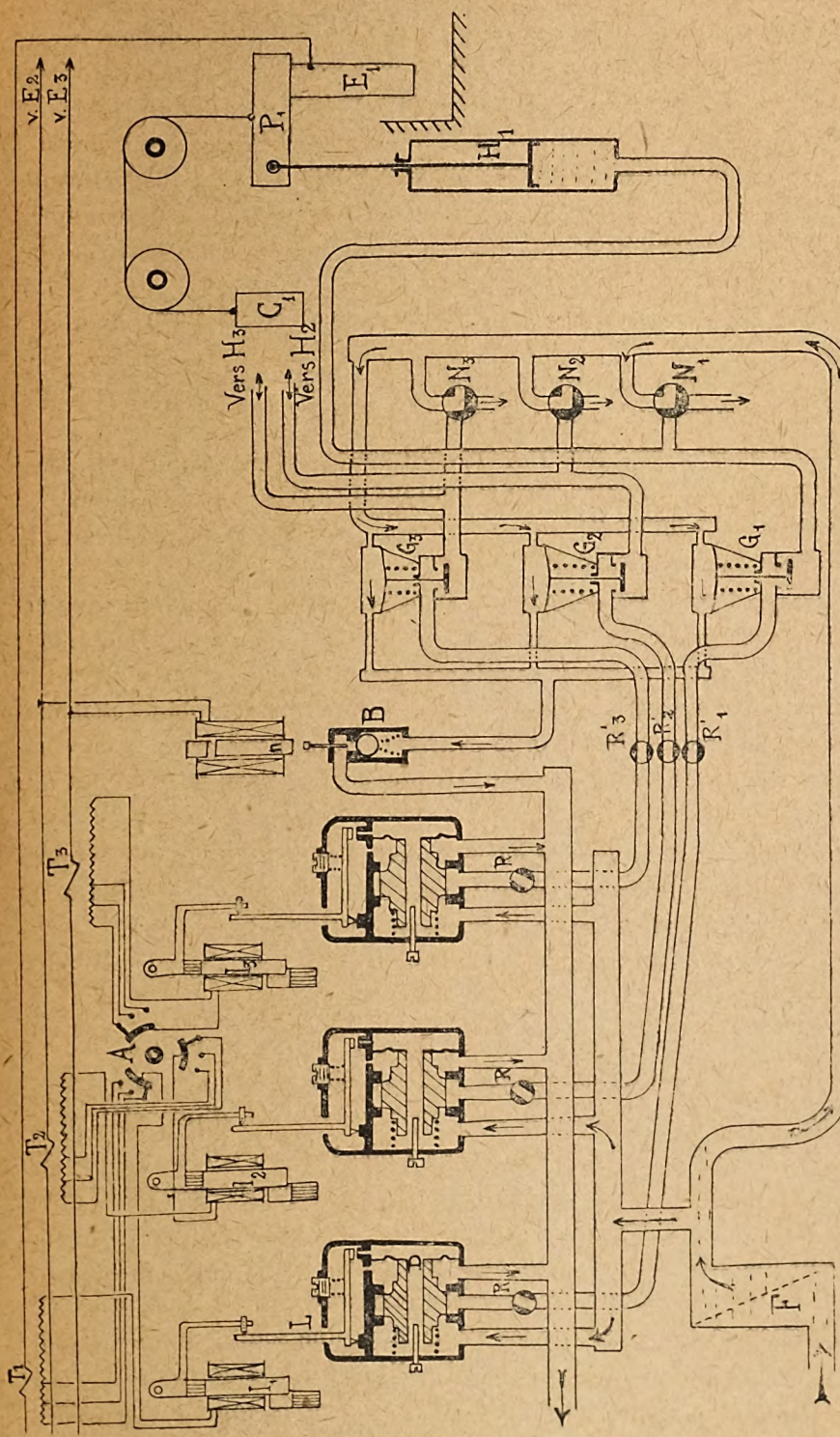


Fig 8. — Schéma d'installation de régulateurs d'électrodes, avec blocage des électrodes en cas de manque de courant (système Arca).

Digitized by Google

tombe, ouvre la soupape B ce qui permet à l'eau qui se trouve sur les membranes des soupapes G_1, G_2 et G_3 de s'écouler. Les ressorts de ces soupapes les font fermer et les électrodes se trouvent bloquées.

Les figures 7 et 8 montrent également des robinets N à 3 voies, qui permettent la commande hydraulique à main.

Le degré d'insensibilité des régulateurs d'électrodes Arca est d'environ : $\pm$ 2 pour cent.

Système de commande hydraulique avec relais électrique.

Le système Brown-Boveri utilise un relais électrique pour commander le distributeur du cylindre hydraulique.

Ce relais est formé par un petit tambour soumis à l'action d'un champ tournant variable avec le courant d'électrode et au couple d'un ressort R (voir figure 9).

Le fonctionnement est le suivant :

Lorsque l'intensité débitée par l'électrode E dépasse la valeur normale, le champ tournant produit un couple plus fort et le tambour tourne de façon à ce que le couple soit équilibré par celui du ressort R. La rotation du tambour entraîne la tige du tiroir du robinet distributeur D. Ce tiroir s'abaisse et le cylindre hydraulique est mis en communication avec l'arrivée d'eau. La pression de l'eau fait remonter le piston et l'électrode.

Inversement si le courant devient trop faible, le couple du ressort R fait manœuvrer le tiroir D dans le sens de la montée et le cylindre hydraulique H est alors mis à la vidange : l'électrode descend.

Le contrepoids C équilibre partiellement le poids de l'électrode et du porte-électrode.

C'est dans les dispositifs Brown-Boveri que l'on trouve, en premier, l'emploi des transformateurs d'intensité à plusieurs rapports. Il est ainsi possible de régler le four pour une série d'intensités différentes de 500 en 500 ampères depuis 1 500 jusqu'à 5 000 ampères par exemple. Le changement de régime est obtenu par la manœuvre d'un commutateur tripolaire en étoile A, à plusieurs directions.

Dans une installation de régulateur d'électrode de ce système, le disjoncteur principal porte des contacts auxiliaires qui servent, en cas de disjonction, à brancher sur les régulateurs une source auxiliaire pour produire le relèvement des électrodes d'une façon automatique.

La Société Brown-Boveri installe également la commande hydrau-

Digitized by Google

lique à main par l'intermédiaire de robinets à trois voies (N figure 9), qui sont manœuvrés par des leviers.

La commande hydraulique du basculement du four est souvent

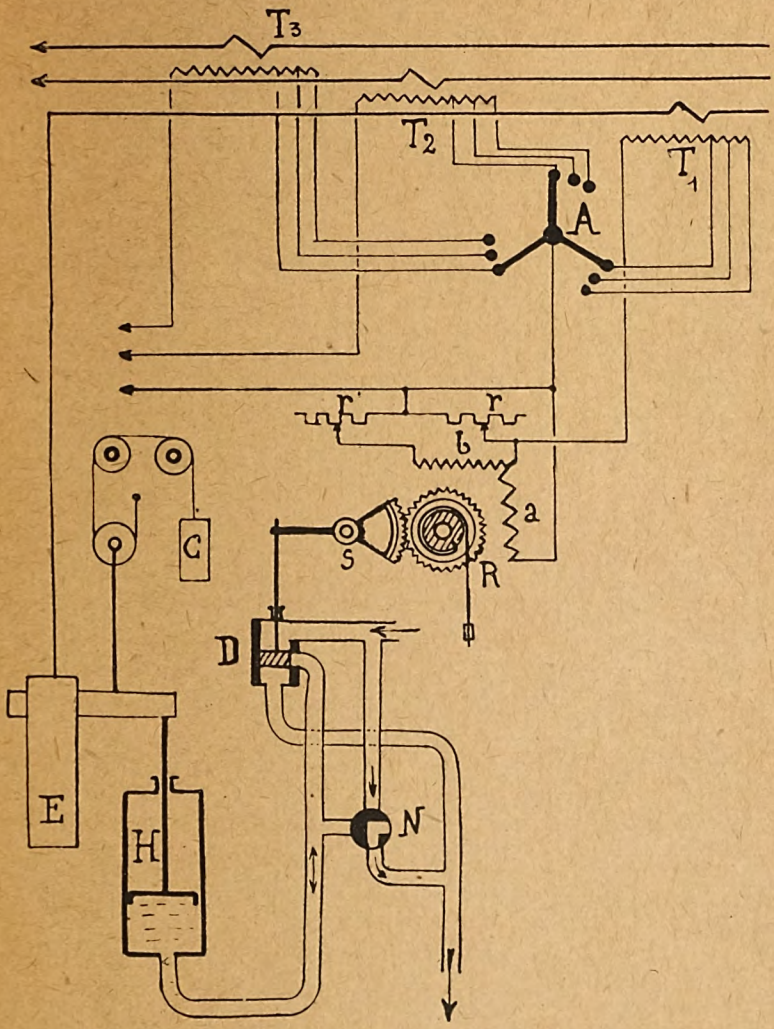


Fig. 9. — Régulateur d'électrode, système Brown-Boveri.

employée; elle ne nécessite qu'un robinet spécial pour alimenter un cylindre à double effet dont le mouvement du piston entraîne le four.

D'après les renseignements que nous a communiqués la Compagnie Electromécanique, la consommation d'eau du système Brown-Boveri est très faible (25 litres par minute pour un four Héroult de 20 tonnes, pendant la période de fusion de gros blocs de fer).

La pression de l'eau peut varier de 4 à 10 kg par cm^2.

Digitized by Google

Une canalisation d'eau sous pression est utilisable, mais l'emploi d'un groupe motopompe offre de grands avantages : consommation presque nulle, minimum d'encrassement des tuyauteries.

REMARQUES GENERALES

L'exposé que nous venons de faire est loin d'être complet, mais les principaux genres de régulateurs d'électrodes de fours ont été examinés.

On peut, maintenant, essayer de faire une étude comparative.

La comparaison peut être faite à plusieurs points de vue :

1° sécurité de fonctionnement ;

2° rapidité de l'action régulatrice ;

3° proportionnalité entre l'action régulatrice et la perturbation ;

4° prix de revient.

Sécurité de fonctionnement.

Les régulateurs d'électrodes travaillent dans le voisinage des fours, c'est-à-dire dans un milieu de température assez élevée et dans les poussières (souvent calcaires).

Ces conditions ne sont évidemment pas favorables aux organes mécaniques délicats, et en particulier aux systèmes à contacts et aux machines tournantes.

Les systèmes hydrauliques sont les plus faciles à entretenir puisque le seul organe mobile extérieur est la tige du piston. Les systèmes à simple effet n'ont même pas besoin d'un presse-étoupe très étanche pour cette tige (Voir figures 6 et 9).

Les systèmes à redresseurs à gaz sont libérés de tout contact mobile et présentent à ce point de vue un grand avantage.

Rapidité de l'action régulatrice.

La rapidité de l'action régulatrice dépend de l'inertie des systèmes. La commande hydraulique est impérative à cause de l'incompressibilité de ce fluide ; elle est, à ce point de vue, certainement supérieure à la commande par moteur électrique réversible.

Les systèmes à redresseurs sont également plus rapides que les systèmes à plusieurs relais électromagnétiques et à plusieurs contacts.

Digitized by Google

Proportionnalité entre l'action régulatrice et la perturbation.

Parmi les systèmes étudiés, ceux qui produisent une action variable avec la perturbation sont les systèmes à redresseurs et les systèmes hydrauliques.

En effet, dans les autres systèmes, le moteur d'électrode tourne avec la même vitesse si la surintensité est faible ou très importante.

Les systèmes à redresseurs produisent une excitation de la génératrice proportionnelle à la variation d'intensité, il en résulte des vitesses variables et plus convenables du moteur de treuil.

Les systèmes hydrauliques ouvrent les lumières du distributeur proportionnellement aux écarts de l'intensité, puisque le distributeur est actionné par un organe dont le mouvement dépend de ces écarts (tambour influencé par un champ tournant ou levier relié à un électro-aimant).

Prix de revient.

Comme dans toutes les installations le prix de revient des régulateurs d'électrodes a son importance; mais, dans tous les cas, le régulateur est un accessoire d'un ensemble (four et transformateur) et le prix du régulateur est une fraction relativement faible du prix total.

Résultats obtenus.

L'emploi des régulateurs automatiques de fours à électrodes est un progrès dans l'électrométallurgie. Les résultats sont bien supérieurs au meilleur réglage à main.

Enfin le réseau est moins troublé et le rendement des installations peut être augmenté.

Les dispositifs spéciaux comme le relevage des électrodes en cas de faible tension sont très intéressants pour la fabrication des aciers spéciaux, ils permettent d'obtenir des produits plus purs et même dans certains cas, ils rendent possible une nouvelle fabrication.

Digitized by Google

Digitized by Google

LA SOUDURE ÉLECTRIQUE

par M. Languepin.

Historique. — Procédés divers. — Soudure Thomson par résistance. — Conditions d'une bonne soudure. — Choix du procédé. — Construction mécanique des machines à souder. — Transformateurs. — Appareillage électrique. — Modes de branchement des machines. — Applications. — Soudure par chauffage indirect.

Historique.

Dès le début de l'industrie électrique les différents procédés de soudure par l'électricité ont beaucoup passionné les inventeurs.

Les premiers brevets concernant la soudure à l'arc paraissent dater de 1885, et c'est en 1886 que Thomson a pris le brevet de la soudure par résistance.

L'un et l'autre de ces procédés ont provoqué vers cette époque un nombre important de travaux, et la constitution de sociétés pour la construction des machines. Aux Etats-Unis la Thomson Welding C°, l'Electrical Forgeing C°, en France la Société pour le travail électrique des métaux, etc...

De 1886 à 1890 il a été déposé aux Eats-Unis plus de 150 brevets sur cette industrie nouvelle, nombre important pour l'époque. Les prévisions des inventeurs d'alors ont dépassé de beaucoup les réalisations actuelles. La puissance des centrales dont on disposait à ce moment ne permettant pas d'utiliser la plupart des inventions décrites. A côté de la soudure on envisageait le chauffage électrique du métal pour la forge, et on brevetait des machines pour refouler, modeler, repousser le métal chauffé électriquement.

Burton décrivit des installations complètes d'ateliers de forge et de soudure, dans lesquels des conducteurs distribuaient partout le courant à basse tension, qui devait permettre de chauffer les pièces.

L'enclume était reliée à un pôle de la distribution, et le marteau à l'autre, pour que le métal se chauffe au moment du choc.

Si toutes ces anticipations ne se sont pas réalisées, les différents pro-

Digitized by Google

cédés de soudure électrique n'en ont pas moins conquis une place assez importante dans l'industrie. Les applications sont si diverses qu'on peut presque dire qu'il n'y a pas de fabrication travaillant le métal qui n'ait utilisé un de ces procédés, mais la capacité de production des appareils de soudure est telle que leur construction ne tient qu'une faible place dans le matériel électrique.

Procédés divers.

On peut classer les procédés de soudure en trois groupes :

1° soudure à l'arc;

2° soudure par résistance à chauffage direct;

3° soudure par chauffage indirect.

La soudure à l'arc comprend divers systèmes parmi lesquels on peut citer :

a) arc entre pièce et électrode métallique fournissant le métal d'apport;

b) arc entre pièce et électrode charbon;

c) arc entre deux électrodes avec ou sans atmosphère spéciale;

d) arc entre les deux pièces (Cyc-arc).

Sans nous étendre sur ces procédés de soudure nous pensons utile de rappeler la technique du dernier, qui paraît se rapprocher de la soudure par résistance.

Un arc court étant amorcé pendant quelques instants entre les deux pièces à souder, on les projette brusquement l'une contre l'autre, en coupant le courant au moment du contact.

Sous le nom de Cyc-Arc, on a créé des appareils qui réalisent automatiquement ces opérations et donnent des résultats très intéressants, en particulier pour la soudure de goujons sur une plaque.

Soudure par résistance.

Les procédés de soudure par résistance, ou par chauffage direct, comprennent :

a) Le procédé Thomson;

b) Le procédé par percussion de Westinghouse;

c) Le procédé électrolytique (Coffin, Lagrange et Hoho).

Tous ces procédés qui dérivent du procédé Thomson, utilisent le passage d'un courant électrique dans les pièces à souder pour pro-

Digitized by Google

duire par effet joule la chaleur nécessaire à la soudure. Nous reprendrons plus loin le procédé Thomson. Le procédé par percussion de la Westinghouse, utilise pour fournir le courant de chauffage, la décharge d'un condensateur. Les pièces réunies aux deux bornes du condensateur chargé sont projetées violemment l'une contre l'autre. Au moment du choc, une décharge oscillante produit un échauffement extrêmement localisé des surfaces en contact et il se forme une soudure.

Par sa très grande rapidité ce procédé présente de nombreux avantages, il permet de souder sans les transformer des métaux très oxydables. Malheureusement les condensateurs sont coûteux et encombrants, ce qui paraît limiter ce système à la soudure de petites pièces.

Le procédé électrolytique, très étudié par COFFIN, qui a pris vers 1886-1890, de nombreux brevets sur ces applications est extrêmement curieux. Les pièces ou plus exactement l'extrémité des pièces à souder est plongée dans de l'eau acidulée, un pôle au liquide, l'autre aux pièces, le dégagement gazeux crée une zone de grande résistance, ce qui produit un échauffement rapide de l'extrémité des pièces et permet la soudure. Cette soudure exécutée dans l'eau paraît paradoxale. Nous ne connaissons pas actuellement d'application de ce procédé pour la soudure, mais il est, paraît-il, utilisé pour la trempe dans certaines régions. Nous parlerons plus loin des procédés de soudure par résistance par chauffage indirect, dont certains ont des applications fort intéressantes.

La soudure par résistance, procédé Thomson.

Dans son premier brevet en 1886, Thomson a décrit avec beaucoup de détails ce procédé en en prévoyant les applications immédiates. Il indiquait bien qu'il s'agissait en réalité d'un procédé de chauffage par l'électricité plutôt que d'un procédé de soudure. La soudure elle-même se fait comme à la forge par compression du métal chaud, et le procédé de chauffage peut être aussi bien employé pour des travaux de forge que pour la soudure.

Le principe de ce procédé est connu de tout le monde, nous le rappelons cependant, pour la facilité des discussions suivantes :

La figure 1 donne le schéma de l'appareil primitif. Deux pinces *a* et *b* en métal conducteur sont reliées aux deux extrémités du secondaire d'un transformateur, pouvant débiter une grosse intensité à basse tension. Ces pinces maintiennent solidement les deux pièces à

Digitized by Google

souder c et d et leur amènent le courant. Une vis V permet de rapprocher b de a. Le passage du courant de c à d amenés en contact produisant de la chaleur, les extrémités de ces pièces seront portées à

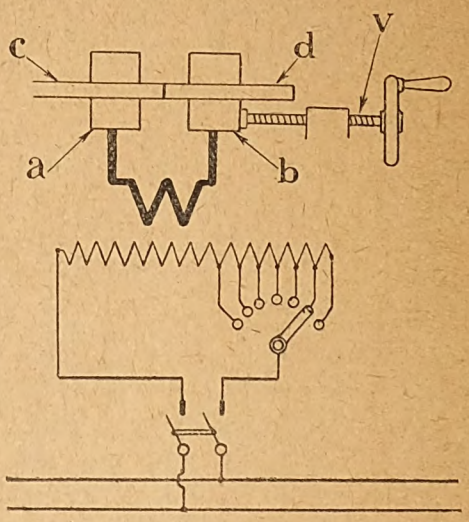


Fig. 1. — Soudure Thomson par résistance.

une température élevée, en comprimant à ce moment avec la vis V on exécute la soudure.

Cette disposition d'appareil permet la soudure par rapprochement

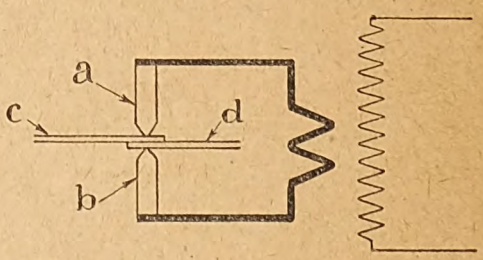


Fig. 2. — Soudure par recouvrement.

de deux pièces de métal, ou des deux extrémités d'un cercle. Avec une légère variante on peut effectuer la soudure par recouvrement (fig. 2). Les deux pièces en métal bon conducteur a et b reliées aux extrémités du secondaire du transformateur appuient sur les deux pièces à souder c et d, le courant traversant les pièces à l'endroit du contact effectue la soudure en ce point.

Cette localisation du chauffage sous les pointes des électrodes qui est

Digitized by Google

une caractéristique de la soudure par recouvrement a donné lieu à de nombreuses discussions de brevets aux Etats-Unis. Pour tourner ce brevet on a employé de nombreux artifices, par exemple le montage représenté par la figure 3 comprenant deux secondaires et deux paires d'électrodes.

La soudure électrique par recouvrement donne une liaison de sur-

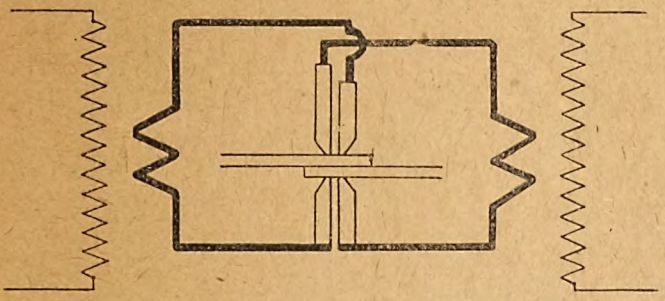


Fig. 3. — Soudure par recouvrement à 2 secondaires.

face déterminée, en général en rapport avec l'épaisseur des pièces, qui forme le point de soudure, comparable à un rivet.

Ce point de soudure joue un rôle important dans beaucoup d'industries. Il a trouvé des applications aussi bien dans la fabrication des jouets, des lampes de T.S.F., des articles de ménage, de bâtiment,

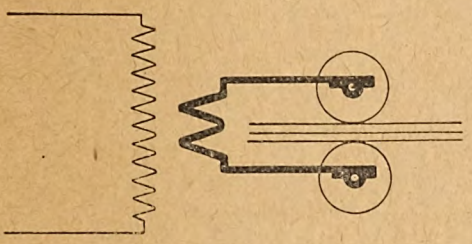


Fig. 4. — Soudure continue sous molettes.

l'automobile, la construction électrique. On a même appliqué ce point de soudure à la charpente métallique et à l'exécution des joints de rails.

En plaçant des points de soudure côte à côte on peut obtenir une soudure continue étanche. Pour accélérer le travail, on remplace alors les électrodes fixes par des molettes tournantes qui entraînent en même temps les pièces (fig. 4).

Pour des pièces en métal très mince, on peut obtenir une soudure

Digitized by Google

continue peu résistante d'ailleurs avec un montage un peu différent représenté figure 5.

Le courant, passant de la molette au bord des pièces tenues dans un montage, les chauffe suffisamment pour les écraser et les souder.

On fait quelquefois des soudures de tôle bout à bout, en employant

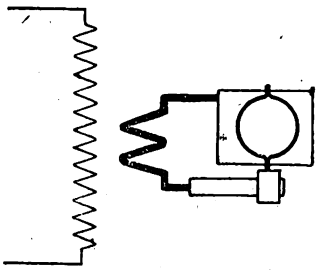


Fig. 5. — Soudure de pièces minces

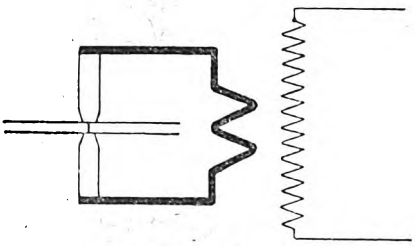


Fig. 6. — Soudure de tôles en bout.

le chauffage transversal avec des machines à souder par recouvrement (fig. 6). Cette méthode de travail ne donne pas des soudures très solides.

Les conditions d'une bonne soudure.

Le procédé de soudure décrit par THOMSON, dès les premiers brevets, indique bien que les pièces doivent être en contact au moment où on ferme le circuit primaire, et qu'on exerce une pression énergique lorsque le métal est chaud. Cette variation de pression pendant la soudure joue un rôle très important. La résistance du contact entre les deux pièces à souder, en dépend dans une large mesure et par suite la plus ou moins grande localisation de la chaleur produite.

Considérons le cas d'une soudure par rapprochement de deux pièces d'acier doux.

Les conditions de formation de la soudure seront déterminées par la température et par la pression exercée en fin d'opération.

Ces deux données ne paraissent pas être indépendantes. On sait depuis longtemps que le plomb se soude à froid sous une simple pression. Les travaux de notre collègue M. FICHTER ont montré que d'autres métaux pouvaient se souder à froid, à condition que les surfaces soient parfaitement polies.

La question soudure semble donc se ramener à la formation d'un contact intime entre les deux pièces, qui peut être obtenu d'une façon quelconque. Peut-on dire que pour souder deux pièces, il suffit de les amener à être en contact suffisamment intime ? Cela paraît probable,

Digitized by Google

mais cela ramène à la définition de ce contact intime et ses conditions d'existence. Les théories de constitution de la matière nous permettraient certainement d'éclairer cette question, ou tout au moins de diriger les expériences.

Il est intéressant de signaler au passage qu'on emploie souvent en parlant d'une soudure donnant une résistance insuffisante le terme de collage. Cette expression aurait besoin d'une définition plus précise.

Très souvent on emploie ce terme, pour désigner toute soudure mal faite.

En réalité, il semble possible d'obtenir des soudures qui, ne présentant pas de différences sensibles à l'examen macrographique de la coupe, paraissent à la cassure être soudées sur toute la surface et ont néanmoins une résistance nettement inférieure à celle du métal. Nous supposons que cela doit correspondre à un grand nombre de défauts de soudure, de surface assez petite pour ne pas paraître à la macrographie, mais diminuant la section utile. La qualité d'une soudure dépendrait du pourcentage de la section qui a été soudée à la section totale.

Si nous admettons que la soudure se ramène à la réalisation d'un bon contact, on voit que l'état des surfaces jouera un rôle très important.

Si on envisage le cas de pièces propres et polies, on peut rechercher expérimentalement les conditions de température et de pression qui donnent la plus grande résistance.

A notre connaissance, il n'a pas été publié de travail méthodique à ce sujet. Des résultats d'essais donnant la résistance obtenue sur un assez grand nombre d'échantillons en fonction des conditions de soudure seraient certainement très intéressants.

Ayant fait une partie de ce travail, nous croyons pouvoir dire que cela n'amènerait pas à la détermination d'un point unique de meilleure qualité de soudure, mais de plusieurs zones équivalentes.

Il semble qu'on pourrait arriver à exprimer ces conditions par une formule, fonction de la température et de la pression. Il serait intéressant de la rapprocher de celle qui relie la résistance du même métal à sa température.

On serait tenté de penser que lorsque la pression dépasse la résistance du métal, on a atteint les conditions suffisantes pour obtenir le bon contact qui entraîne la soudure. L'expérience montre qu'on peut refouler des pièces chaudes l'une contre l'autre, sans avoir une sou-

Digitized by Google

dure. On constate aussi qu'il ne suffit pas qu'une des pièces chaudes se moule parfaitement sur l'autre restée à une température inférieure.

La variation de la résistance du métal avec la température donne un moyen commode de mesure de la température du métal.

Beaucoup de machines à souder par rapprochement sont d'ailleurs munies d'un dispositif automatique de rupture du courant, basé sur la valeur du refoulement sous une pression donnée.

Si on envisage le cas, plus fréquent dans la pratique, de métal brut pouvant être graisseux, rouillé, oxydé ou calaminé, la soudure ne s'effectue pas de la même façon.

Les particules d'oxydes, carbonates ou autres impuretés, si elles restent dans la soudure, formeront des inclusions, diminueront la surface réellement soudée. Dans la soudure par rapprochement, on pourra les éliminer en grande partie, en refoulant assez fortement le métal, de manière à former un bourrelet qui les entraînera. Une soudure faite lentement, permettra une légère diffusion des scories dans la masse, répartissant le défaut dans plusieurs plans. Une soudure faite avec fusion, permettra d'éliminer complètement ces scories.

En dehors de la température et de la pression en fin de soudure, nous avons vu qu'on pouvait obtenir une plus ou moins grande localisation du chauffage d'après la résistance du contact au début, on peut aussi, en variant la tension du transformateur et la distance entre les mâchoires, obtenir différentes vitesses de chauffage.

Tous ces changements permettent de réaliser sur une même machine, ou sur des machines paraissant semblables, des soudures très différentes, comme processus et comme aspect final. Une pression assez forte au début, une tension peu élevée, produisant une élévation de température assez lente, donnent un chauffage sur une assez grande longueur, et un bourrelet bien arrondi et lisse.

Avec une pression moyenne au début, une tension faible, le chauffage est plus localisé, le bourrelet devient irrégulier et plus aigu. Une pression moyenne au début, augmentant très rapidement pour devenir très élevée, une tension secondaire élevée faisant passer dans la soudure une très grosse puissance, donneront un chauffage très rapide, très limité, un petit bourrelet aigu, net, si toutefois le courant est coupé à temps, ce qui n'est guère possible que sur une machine marchant automatiquement. Si on ferme le circuit primaire avant que les pièces ne soient en contact, avec une tension secondaire assez élevée, et si on les rapproche doucement l'une de l'autre, elles viendront d'abord se toucher par leurs petites aspérités. Celles-ci seront immé-

Digitized by Google

diatement fondues par le passage du courant, on amorcera ainsi un régime d'étincelles fondant le métal à l'extrémité des deux pièces et le projetant assez violemment. La chaleur produite par ces mauvais contacts et aussi par la combustion de ces particules amènera rapidement l'extrémité des pièces à la température voulue pour la soudure. A ce moment, on les comprimera brusquement en coupant le courant.

On voit, par ces quelques cas, toute la gamme de « procédés » de soudure, qui sont surtout des tours de mains, qu'on peut réaliser. Chacun d'entre eux présente ses avantages.

La soudure lente met en jeu une faible puissance, elle ne demande à l'ouvrier aucune habileté et peut être utilisée sur du métal très sale sans inconvénient. Le bourrelet, de bon aspect, peut souvent être laissé, ce qui constitue un renforcement.

Une soudure plus rapide économise le temps et le courant, mais est plus difficile à exécuter, demande une machine plus coûteuse et met en jeu une puissance instantanée plus grande.

La soudure « par étincelles » demande un tour de main assez facile à acquérir, met en jeu une puissance un peu plus élevée que la soudure lente, et réduit sensiblement la dépense de courant. Elle élimine par la projection du métal les scories, rouille et oxydes qui peuvent se trouver à la surface des pièces. Elle permet de réaliser des travaux qui, avec le procédé de soudure par résistance, demanderaient une préparation très soignée des extrémités et un entretien sévère des mâchoires et des guidages. Par exemple, pour la soudure en bout des pièces minces et larges, si les extrémités ne sont pas coupées bien net et droit, le contact se fera au début par un seul point, qui se refoulera sous la pression, puis continuant à chauffer arrivera à brûler avant que les autres parties de la pièce ne soient à température convenable. Si les mâchoires de guidages ne sont pas bien en face et bien parallèles ou si les pièces sont un peu pliées, l'effort de pression fera dévier les pièces dans le plan de moindre résistance et elles passeront l'une à côté de l'autre. Un exemple de travail pour lequel la soudure par étincelles a permis des résultats qu'on n'aurait pas pu avoir par résistance, est la réparation des tubes de chaudières de locomotives. On doit souder un bout de faible longueur à l'extrémité d'un tube assez long ayant déjà servi, par suite gauche et légèrement déformé. Il est pratiquement impossible d'obtenir un alignement parfait et même une coupe bien droite, lorsqu'on soude par résistance; on a presque toujours, soit des points trop chauds, soit des points où, par suite du

Digitized by Google

défaut d'alignement, les bords des tubes se sont chevauchés. Par étincelles, on obtient des résultats parfaitement réguliers et donnant une solidité telle que l'emploi de ce procédé a été autorisé après de nombreux essais pour la réparation des tubes de chaudières de navires.

En prolongeant la période d'étincelles, on peut amener les deux surfaces à souder à être recouvertes d'une couche mince de métal en fusion ; si on fait la compression à ce moment, on obtient une soudure qui se rapproche beaucoup plus de la soudure autogène que de la soudure à la forge; ce procédé est particulièrement intéressant pour la soudure de deux métaux différents où il permet d'obtenir une zone de transition un peu étendue formée d'un véritable alliage des deux métaux.

On peut aussi exécuter des soudures de pièces ayant des sections très différentes, ce qui est parfois assez délicat autrement, la différence de capacité calorifique et de conductibilité tendant à créer un écart de température des deux pièces.

Le bourrelet produit par la soudure par étincelles est très différent de celui que produit le procédé par résistance. Il se présente sous la forme de projections de métal de faibles dimensions, assez fragiles et faciles à enlever par burinage ou cisaillage.

L'inconvénient de ce procédé est d'entraîner la perte d'une certaine quantité de métal et de faire des projections d'étincelles assez gênantes.

On peut combiner ces procédés, en commençant le chauffage d'une pièce avec une certaine pression, continuer la soudure en faisant des étincelles ou inversement. On exécute parfois des soudures en plusieurs opérations, en coupant le courant momentanément pour laisser la chaleur se répandre.

Choix du procédé.

Le choix du procédé dépend d'un grand nombre de variables.

a) Nature du métal. — L'acier doux peut être soudé indifféremment par tous les procédés. Il est assez difficile sans appareils automatiques de souder très rapidement les aciers durs. Ils passent rapidement à l'état pâteux et tombent. La soudure de deux métaux différents ne peut guère être faite à la main que par étincelles, il est très difficile autrement d'égaliser la température des deux pièces.

Pour la soudure des métaux très conducteurs, cuivre, laiton, aluminium on est obligé de commencer avec une pression faible si on ne veut pas être obligé d'utiliser une puissance très considérable.

Digitized by Google

b) Etat du métal et préparation des pièces. — Nous avons vu l'influence de la présentation des surfaces en contact. Certains procédés très rapides ne sont intéressants qu'avec des pièces propres et bien coupées.

La soudure électrique produit toujours une zone trempée sur les aciers; le procédé de soudure lente réduit l'importance de cette trempe.

c) Forme des pièces. — Nous avons déjà parlé du cas des pièces minces ou de sections différentes.

La soudure des pièces en té présente quelques difficultés. On emploie le procédé par étincelles, ou des machines spéciales à deux transformateurs dont l'un fournit un courant passant seulement dans la pièce transversale.

d) Utilisation des pièces. — Suivant les besoins, on pourra être amené à choisir le procédé le plus économique ou celui qui donne la plus grande sécurité ou la meilleure présentation.

e) Nombre de pièces à fabriquer. — Suivant l'importance de la série, on envisagera l'emploi de machines automatiques, de montages spéciaux, ou on se contentera de moyens de fortune.

f) Précision à obtenir. — Si on n'emploie pas de machines automatiques ou semi-automatiques, il est plus facile d'obtenir une grande précision avec la soudure lente.

g) Puissance disponible.

h) Prix du courant.

i) Prix de la machine. — Une soudure lente demande une puissance faible, une machine peu coûteuse, une grande consommation de courant et donne une production réduite. Une machine très rapide économise la main-d'œuvre et le courant, mais coûte cher et surtout met en jeu une puissance très importante, ce qui entraîne parfois à des redevances élevées ou à des installations difficiles à amortir.

j) Personnel disponible pour l'entretien et le réglage.

Cette longue énumération montre combien de considérations peuvent entrer en jeu pour le choix des conditions de soudure et de la machine; et explique les différences qui se présentent entre les résultats indiqué des différents côtés.

Tout ce que nous venons de dire pour la soudure par rapprochement, peut s'appliquer à la soudure par recouvrement, par points ou en continu. Mais ici, le problème se complique encore. Les électrodes qui amènent le courant aux pièces, fournissent également la pression qui doit effectuer la soudure.

Digitized by Google

Cette pression doit être suffisante pour assurer un bon contact électrique entre les électrodes et les pièces et réduire au minimum sa résistance. Elle doit également créer un point minima de résistance entre les deux pièces, pour que la soudure se fasse à l'endroit où les électrodes appuient et non en un point quelconque. On voit immédiatement par là qu'il n'est pas possible, en soudure par recouvrement, d'employer un procédé analogue à celui dit par étincelles. Il faut dès le début, avant que le courant soit fermé, un minimum de pression pour ne pas avoir d'échauffement sous l'électrode, et quelquefois une pression très élevée pour amener les deux pièces en contact. Deux tôles, à moins d'être parfaitement dressées, ne portent pas, même grossièrement, sur toute leur surface et il suffit d'une légère bosse, peu profonde et de faible rayon pour qu'elles ne portent pas précisément à l'endroit où l'on veut faire la soudure. On est donc amené souvent à employer, avant le commencement de la soudure ou dès le début, des pressions qui peuvent être élevées.

On rencontre là, une des difficultés de l'emploi de la soudure par recouvrement pour les pièces de grosses épaisseurs : transmettre une grande pression avec des électrodes en matière ayant une bonne conductibilité calorifique et électrique et placées en contact avec des pièces chaudes.

Les métaux bons conducteurs, comme le cuivre ont, à chaud, une mauvaise résistance mécanique; la pièce tend donc à s'écraser, la surface de contact devient plus grande, les conditions de l'opération sont changées et la soudure se fait mal. En dehors du refroidissement d'eau, connu depuis le début, on a essayé beaucoup de procédés pour supprimer cet inconvénient, sans obtenir des résultats satisfaisants pour les très grosses épaisseurs. Parmi les procédés utilisés on peut citer :

Emploi d'une cape mince recouvrant l'électrode de remplacement, alliages spéciaux. L'augmentation de résistance électrique et calorifique entraîne un échauffement trop grand, d'où usure. Certains alliages essayés récemment semblent devoir donner des résultats, si on peut les obtenir à des prix assez bas.

Emploi d'une cape mince recouvrant l'électrode, de remplacement facile et peu coûteux. Ce procédé ne fait que tourner imparfaitement la difficulté.

Emploi d'une pièce en métal dur, pour fournir la pression et d'une pièce de contact en cuivre. De nombreux modèles d'électrodes ont été essayés sans résultat. La pièce d'acier s'échauffe trop rapidement, s'use et parfois se soude, ou la soudure se fait mal.

Digitized by Google

Emploi d'une pastille placée entre les deux pièces à souder, créant le point de localisation de la chaleur et permettant d'avoir des électrodes très larges. Ce procédé est fort intéressant, mais la mise en place de la pastille est assez difficile.

La meilleure façon d'éviter l'usure des électrodes, tout au moins pour les faibles épaisseurs, est d'amener un bon contact entre celles-ci et les pièces, de souder vite et de réduire l'échauffement au minimum.

Ces dernières conditions entraînent le plus souvent l'emploi de machines automatiques dans lesquelles la durée d'application du courant est indépendante de l'ouvrier. Ces appareils ont l'inconvénient

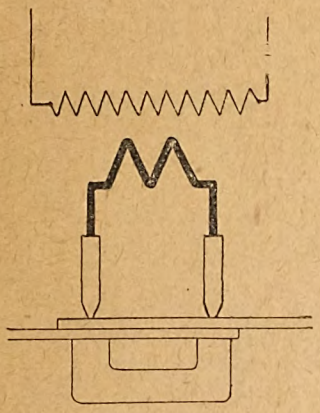


Fig. 7. — Soudure en 2 points avec 1 transformateur.

de demander un minimum d'entretien très souvent difficile à obtenir, et de mettre en jeu une puissance élevée.

Une des difficultés que présente la soudure par recouvrement, provient de la nécessité de passer des deux côtés des pièces à souder qui peuvent être d'assez grandes dimensions. On est amené à donner une grande longueur aux bras portant les électrodes et conduisant le courant.

On emploie assez couramment des machines ayant une ouverture un peu supérieure à un mètre, mais quand on veut atteindre des dimensions plus grandes, on est gêné par le poids et le prix des bras et des conducteurs. La self inductance du circuit formé par ces bras, nécessairement assez écartés, devient très importante. Le facteur de puissance baisse rapidement, d'où la nécessité d'employer des transformateurs très importants et de mettre en jeu une puissance apparente hors de proportion avec le travail à exécuter. Pour remédier à cet inconvénient, on a essayé (plusieurs fois breveté) de faire deux points à

Digitized by Google

la fois avec un ou deux transformateurs. Le montage est facilement compréhensible d'après les schémas ci-joints (fig. 7 et 8). Cette disposition donne de bons résultats, à condition d'espacer suffisamment les points et d'obtenir l'égalité de pression et de contact sur les deux électrodes, ce qui n'est pas toujours facile.

Les inconvénients dus à la présence de rouille et de calamine que nous avons rencontrés au sujet de la soudure par rapprochement, ont une importance encore plus grande dans la soudure par recouvre-

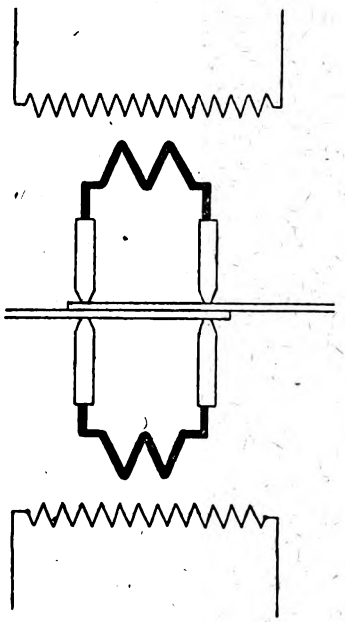


Fig. 8. — Soudure en 2 points avec 2 transformateurs.

ment. Il n'est plus possible d'éliminer les impuretés par refoulement ou projection, puisqu'il s'agit de deux pièces en contact, qui ne sont chauffées que sur une faible partie de la surface. On doit donc admettre que celles-ci resteront dans la soudure et on est amené à lui donner une section suffisante, pour qu'elle présente la résistance mécanique demandée. Lorsque cela n'est pas possible, on peut améliorer les soudures en prolongeant suffisamment le chauffage, pour que les oxydes puissent se répartir dans l'épaisseur du métal sans rester uniquement dans la surface de travail. Ce procédé présente d'ailleurs de nombreux inconvénients. Si le métal est porté à une température trop élevée, la moindre influence peut le chasser et former une soufflure au centre de la soudure; la pression de l'électrode tend à chasser le

Digitized by Google

métal vers l'extérieur et d'autre part l'échauffement général de la pièce tend à produire des déformations.

L'irrégularité de l'état de la surface, créant une plus grande résistance au contact électrode métal, provoque également un plus grand échauffement de l'électrode.

Pratiquement, on obtient des résultats très satisfaisants dans l'emploi de la soudure par recouvrement, à condition de majorer la section des points qu'il serait nécessaire d'avoir, si la soudure était faite partout, d'un certain pourcentage qui dépend de l'état de la surface du métal. Cela correspond à une augmentation du nombre de points, qui suffit parfaitement à donner la sécurité.

Les dispositifs automatiques de coupure de courant perdent une partie de leurs avantages, sur des tôles irrégulièrement sales ou oxydées, la section de passage du courant pouvant varier.

La soudure par recouvrement continu, faite au moyen de molettes tournantes est forcément automatique, puisque l'entraînement des pièces se fait à vitesse constante.

Sur des tôles très bien décapées, ce procédé fonctionne sans difficulté. Il y a lieu cependant d'entretenir très soigneusement les machines. Leur construction exige un contact frottant qui amène le courant à la molette, et dans lequel passe une grosse intensité sous une faible tension. Ce contact doit être maintenu très propre, le moindre encrassement produisant des échauffements qui entraînent rapidement un grippage. L'automaticité de marche de ces machines, qui n'est basée que sur le temps, fait qu'elles sont très sensibles aux variations de tension du réseau d'alimentation. Si un abaissement de tension peut créer un défaut de soudure, un relèvement peut entraîner une légère piqûre de la surface de la tôle qui laissera des particules métalliques fixées à la molette. Celles-ci, au second passage, seront la cause d'une augmentation d'échauffement de la partie supérieure, d'où augmentation de ce dépôt, qui bientôt deviendra tel que la molette sera détériorée.

Une autre difficulté de la soudure continue, provient de ce que la chaleur transmise par la tôle tend à augmenter la température de soudure de sorte que, pour les pièces longues, on est obligé de travailler par éléments pour laisser refroidir.

On utilise, pour éviter ces inconvénients, des interrupteurs rotatifs qui coupent le courant primaire à intervalles réguliers assez fréquents.

Sur des tôles oxydées, la soudure continue est très difficile. Lorsque

Digitized by Google

la molette passe sur une partie très sale, formant presque isolant, le courant est coupé et il se produit une étincelle entre le métal et la molette, d'où perforation de la tôle.

Le procédé dit « pas à pas » évite en partie cet inconvénient. L'électrode tourne par saccades et le courant est coupé quand l'électrode tourne. On obtient une succession de points faits avec une électrode tournante.

Nous venons de voir rapidement les difficultés que présente l'emploi de la soudure électrique par résistance.

Il ne faudrait pas tirer de cet exposé des conclusions défavorables à l'emploi de cette soudure. Tous les procédés industriels, et surtout ceux de la métallurgie, ont un certain coefficient d'irrégularité, dont on tient compte dans les calculs. La présence de défauts possibles dans les métaux n'en empêche pas l'emploi, avec un coefficient de sécurité.

Avec la soudure par rapprochement, on peut considérer qu'il n'est pas nécessaire de majorer les coefficients de sécurité habituellement employés. Un travail normalement conduit sur du métal courant, ne produira pas une diminution de résistance à la soudure supérieure à celle que peuvent produire les irrégularités du métal.

En général, on restera très en dessous des tolérances normales des essais de résistance.

Pour la soudure par recouvrement, on ne doit pas calculer la résistance d'une série de points en partant de leur section, sans tenir compte d'un coefficient de sécurité qui dépend de la propreté du métal.

La grande localisation de l'échauffement produit par la soudure électrique, fait que le refroidissement de la soudure et surtout des zones voisines est très rapide, ce qui provoque une trempe de ces parties. Cette trempe se produit, non seulement sur les aciers dits trempants, mais souvent sur des aciers dits doux, qui en réalité sont susceptibles d'une légère trempe. Ce phénomène ne présente ordinairement aucun inconvénient. Cependant, pour certains travaux comme la fabrication d'outils par soudure de pièces en acier rapide sur demi-dur, il est absolument indispensable de faire subir un recuit soigné à la pièce venant d'être soudée avant de la travailler.

Dans la soudure par recouvrement, il se produit, sur des aciers légèrement trempants, une zone circulaire plus dure. Cela permet, en séparant deux tôles soudées par points, d'obtenir un déchirement régulier du métal autour du point de soudure, en laissant dans une pièce

Digitized by Google

un trou rond et sur l'autre une partie découpée, qui laisserait supposer que la soudure a une section beaucoup plus grande qu'elle n'est en réalité.

Construction mécanique des machines à souder.

La disposition mécanique de la machine à souder a été un des premiers points étudiés. On conçoit qu'elle joue un grand rôle, puisque c'est d'elle que dépend la commodité d'emploi de la machine, et une bonne partie de sa robustesse.

Il a été pris un nombre considérable de brevets sur ce point, tant pour des machines de type courant que pour des modèles spéciaux destinés à des applications déterminées.

Cette question laisse le champ libre à beaucoup de travaux, bien que, pour certains types, un grand nombre de constructeurs aient adopté des modèles qui paraissent ne différer que par des détails.

Les principales conditions que doit remplir la partie mécanique d'une machine à souder paraissent :

1° Etre d'un emploi commode pour permettre une grande production et s'adapter à la plus grande variété possible de travaux.

2° Etre robuste, pour résister aux efforts normaux et aux mauvais traitements très fréquents. Avoir des organes bien protégés et assurer la protection de la partie électrique.

3° Pour une part importante, être construite en métal bon conducteur, avec des sections suffisantes pour laisser passer sans trop de pertes des intensités très élevées.

4° Comporter le minimum de joints possible sur le parcours du courant (les machines sont fréquemment mal entretenues et la vérification du serrage des joints est souvent difficile à obtenir).

5° Assurer l'isolement d'une ou des deux extrémités du secondaire et autant que possible la protection de ces isolants.

6° Permettre d'obtenir une valeur déterminée de la self inductance du circuit secondaire, très souvent réduite au minimum compatible avec la protection et la commodité d'emploi.

7° Pour certains types de machines, présenter une précision assez grande malgré les efforts et les échauffements.

8° Très souvent amener par des circulations d'eau, le refroidissement des parties voisines de la soudure.

La robustesse et la bonne protection d'une machine sont des points très importants.

Digitized by Google

Si une partie des machines à souder va dans des ateliers où elles sont bien entretenues et convenablement manipulées, il y en a beaucoup qui vont dans des ateliers de forge où elles sont utilisées par des manœuvres habitués aux travaux durs et travaillant aux pièces.

L'entretien, quand il est fait, reste dans le genre de celui que demande le matériel de forge, ne craignant ni l'eau, ni le feu, ni les chocs. Il faut donc, dans ce cas, des machines lourdes et solides.

Il est évident que toutes les machines ne doivent pas être construites dans cet esprit et n'ont pas à subir ces traitements. Cependant, même pour des machines destinées à des travaux légers — la tôlerie par exemple — il est très souvent impossible d'obtenir un entretien élémentaire et un réglage simple.

Malgré toutes les recommandations, il arrive souvent de voir des machines en panne parce qu'on a mis du carton dans les joints qui doivent laisser passer le courant, ou parce que les poussières produites par le frottement de l'interrupteur l'ont mis en court-circuit.

Les machines qui travaillent par le procédé dit par étincelles ont besoin d'une protection spéciale. Le métal projeté pénètre partout, et provoque l'usure des parties frottantes et des isolants. Nous connaissons des machines travaillant ainsi, qui pulvérisent 70 kg de métal par jour.

En dehors de son rôle de support de la partie mécanique qui entraîne parfois des efforts élevés, le bâti doit presque toujours protéger la partie électrique, transformateur et appareillage.

Quelques constructeurs placent le transformateur en dehors du bâti de la machine. Cette disposition, qui paraît d'ailleurs de plus en plus abandonnée, sauf cas spéciaux, permet d'établir une bonne protection du transformateur, mais entraîne une augmentation considérable de la longueur du secondaire et par suite de sa self inductance.

L'appareillage électrique, interrupteur et commutateur, est souvent placé à l'intérieur du bâti. Beaucoup de machines américaines sont montées avec des contacteurs qui peuvent être fixés à une certaine distance de la machine.

La partie mécanique d'une machine à souder par rapprochement comprend, en principe, deux pinces permettant de serrer fortement les deux pièces à souder. Ces pinces sont reliées chacune à une extrémité du secondaire du transformateur, et par suite l'une au moins d'entre elles doit être isolée de son support. Un dispositif mécanique permet de rapprocher ces deux pièces l'une de l'autre pour comprimer la soudure en fournissant une pression assez élevée.

Digitized by Google

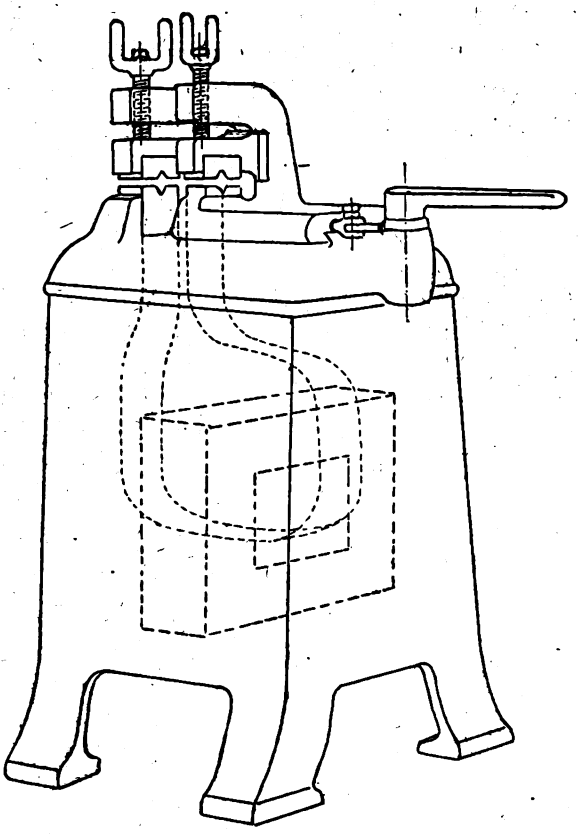


Fig. 9.

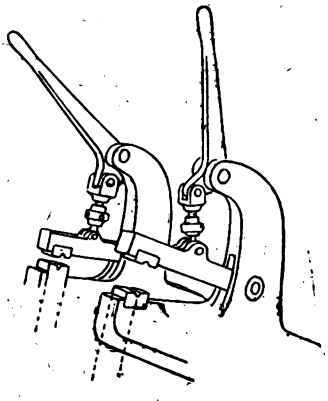


Fig. 10.

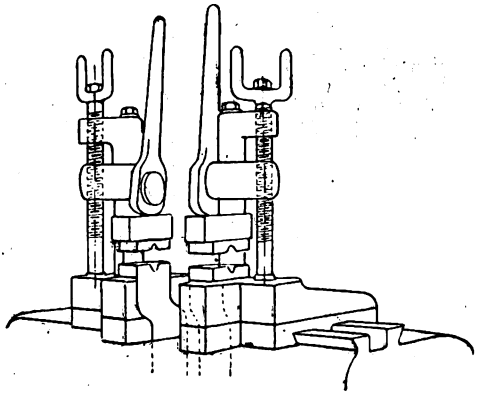


Fig. 11.

Dispositifs divers de serrage.

Digitized by Google

En général, ces deux pinces, ou au moins l'une d'entre elles, sont montées sur un chariot ou forment elle-même chariot, de façon à pouvoir coulisser sur un banc fixé au bâti.

Le dispositif le plus simple comprendrait deux pinces se serrant par

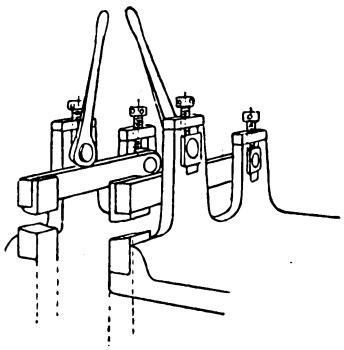


Fig. 12.

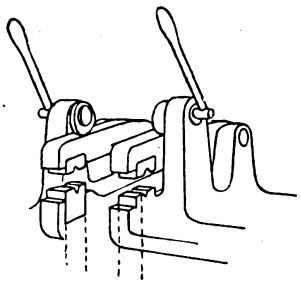


Fig. 13.

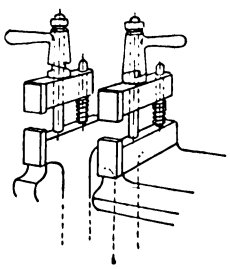


Fig. 14.

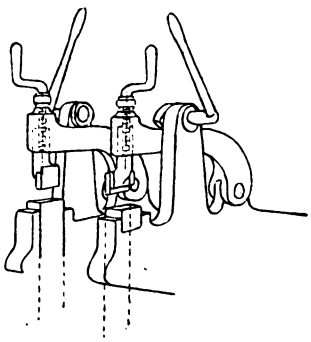


Fig. 15.

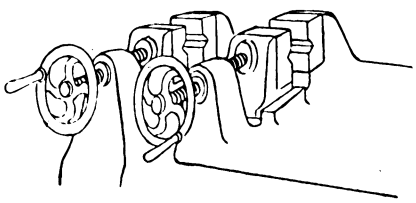


Fig. 16.

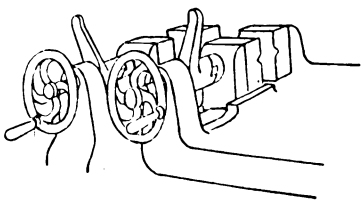


Fig. 17.

Dispositifs divers de serrage.

des vis montées sur des chariots, par l'intermédiaire d'un isolant et coulissant sur un banc de guidage. Un secondaire souple pourrait être relié directement à ces deux pinces, le transformateur étant placé en dessous.

L'ouverture de ces pinces peut être verticale ou horizontale, placée

Digitized by Google

au milieu du banc de guidage, légèrement excentrée ou même complètement déportée pour être en dehors du bâti. Les deux parties formant serrage peuvent glisser parallèlement ou tourner autour d'un

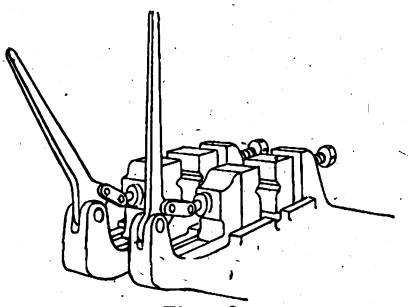


Fig. 18.

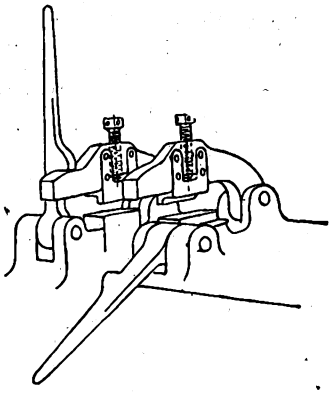


Fig. 19.

Dispositifs divers de serrage.

axe. Le système de serrage des pinces peut être une vis, de manipulation un peu longue, ou un ensemble de vis et de cames ou genouillères permettant un réglage approximatif, suivant les dimensions des pièces, et serrage rapide et énergique pour la fixation.

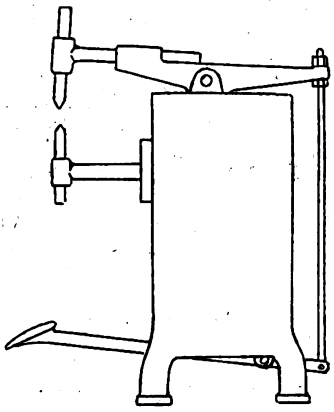


Fig. 20. — Bras supérieur oscillant.

Le dispositif de compression de la soudure peut être commandé par une vis ou un levier, avec une came ou une genouillère.

Les croquis (fig. 9-19) ci-joints représentent schématiquement quelques-uns des dispositifs de serrage les plus couramment utilisés pour les machines de petite et de moyenne puissance.

Pour les machines de grosse puissance, on emploie des dispositifs

Digitized by Google

de serrage et de compression commandés par moteur à l'air comprimé ou hydrauliquement.

Pour les machines à souder par recouvrement ou par points, on peut classer grossièrement les machines en deux groupes :

Les machines à bras supérieur oscillant (fig. 20).

Les machines à bras supérieur fixe et électrode supérieure à déplacement vertical (fig. 21).

Bien entendu, dans chacun de ces groupes un grand nombre de détails plus ou moins heureux donnent à chaque modèle un caractère propre.

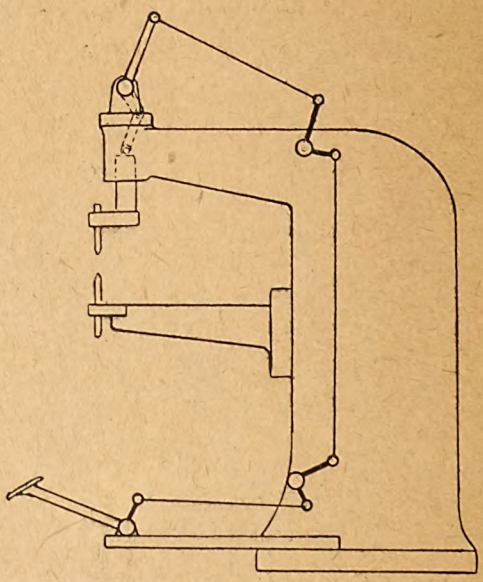


Fig. 21. — Electrode supérieure à déplacement.

Les machines à souder continues sont très souvent montées sur des bâtis de machines à souder par points, à bras supérieur oscillant ou à bras fixe, les électrodes étant remplacées par un système de molettes commandées à la main ou au moteur. Les machines à bras oscillant ne peuvent être utilisées pour faire des soudures de grandes longueurs, le guidage des bras étant insuffisant. Certains constructeurs remplacent la molette inférieure par un chariot portant une réglette de contact qui se déplace avec la pièce à souder pour assurer son guidage. On construit également des machines dans lesquelles la pièce reste fixe, et où la molette de soudure se déplace en roulant.

En dehors des machines courantes, on établit des machines à souder

Digitized by Google

spéciales par rapprochement, par points ou en continu, pour des travaux de grande série dont le fonctionnement est entièrement automatique, les pièces étant amenées sur chaînes ou sur plateaux.

Les transformateurs.

Les conditions de fonctionnement d'un transformateur de machine à souder sont beaucoup plus irrégulières que celles qui sont prévues pour le matériel électrique courant.

En gros, on a une marche intermittente avec passage de la charge maximum à la marche à vide, avec une durée de charge en général faible par rapport au temps total.

Le constructeur qui ne sait pas en général exactement à quel travail la machine sera utilisée, ignore le rapport du temps de marche en charge au temps de marche à vide, et même en partie quelle est la valeur de la charge maximum.

Pour permettre le réglage de la vitesse de chauffage suivant la section ou l'épaisseur à souder, on emploie des transformateurs permettant de faire varier la tension secondaire à vide. Presque toujours cette variation est obtenue par des prises sur le bobinage primaire faisant varier le nombre de spires, quelquefois par des changements de couplage des sections primaires, et très rarement par l'emploi d'inductances ou de résistances.

Quel que soit le procédé de réglage prévu, il met entre les mains du client la possibilité de faire varier la charge de la machine dans une très large mesure. Une machine à souder par points qui aura été prévue, par exemple, pour souder une épaisseur totale de métal de 10 mm, avec une tension secondaire convenable pour absorber dans ce cas une puissance déterminée, pourra être utilisée avec la même tension secondaire pour souder une épaisseur de 2 mm, ce qui lui fera absorber une puissance beaucoup plus élevée.

Il pourra arriver que cette façon de travailler soit plus avantageuse pour le client, mais elle sera dangereuse pour la machine, car, non seulement la puissance maximum absorbée est très élevée, mais, comme les pièces soudées pourront être légères, la fréquence des soudures dépassera celle qui a été prévue, sans que la réduction de durée de la charge compense la différence.

Inversement, si une machine prévue pour souder très vite automatiquement est utilisée pour souder lentement en surchauffant les pièces, le transformateur sera surchargé.

Digitized by Google

Un chiffre indique la variation de puissance; nous avons vu deux machines effectuant le même travail; l'une, avec pression et vitesse modérée, absorbait 80 ampères, l'autre à forte pression initiale et grande vitesse, donnait au même ampèremètre un lancé de 400 ampères.

La résistance du point à souder dépend de la pression et de la surface de contact des électrodes sur les pièces (on prend souvent un diamètre à peu près égal à l'épaisseur à souder). Une augmentation de pression et de surface de contact des électrodes sur les pièces diminue la résistance, augmente la masse de métal à chauffer et les pertes, d'où ralentissement de la soudure et échauffement du transformateur.

On peut obtenir des variations du même ordre dans la soudure par rapprochement. Nous avons vu exécuter des soudures de 400 mm² de section en mettant en jeu une puissance apparente de 200 kVA, alors qu'on effectue couramment ce travail avec 15 kVA. Il faut, pour tous les transformateurs de soudure, prévoir le cas d'une mise en court-circuit complet de faible durée, une fausse manœuvre pouvant mettre les électrodes en contact.

La mesure de la puissance prise par une machine à souder est souvent difficile. Les soudures durent peu de temps, parfois une fraction de seconde, et la puissance absorbée varie pendant la soudure. En général, en soudure par rapprochement, l'intensité absorbée décroît au début puis augmente; en soudure par recouvrement, suivant l'état du métal, elle décroît rapidement ou augmente pour diminuer ensuite. Dans tous les cas, il est impossible de se baser sur la lecture d'un appareil indicateur et, à plus forte raison d'un enregistreur, qui a une inertie trop grande.

Sauf pour les gros travaux, on est obligé de recourir à des appareils spéciaux qui ne sont pas d'un emploi industriel commode. Il est très difficile de comparer les résultats d'essais qui sont quelquefois publiés, lorsqu'on ne possède aucune indication sur la façon dont les mesures ont été faites. Il serait à désirer que les communications indiquent toujours si on a lu la pointe ou une moyenne et quel est l'appareil employé.

Les mesures au compteur qui semblent intéressantes, ne sont valables que pour un très grand nombre de soudures, le retard ou l'avance au démarrage de ces appareils entraînant des variations considérables des résultats.

Beaucoup de constructeurs offrent des machines à souder en indiquant une puissance en kilowatts. Comme ils ne spécifient pas avec

Digitized by Google

quel régime de marche est prévue cette puissance, cette dénomination n'a aucun sens, et ne peut qu'induire l'acheteur en erreur. D'autres maisons indiquent seulement le diamètre ou l'épaisseur qu'on peut souder sur la machine en sèrvice normal. Cette façon de faire manque de précision, mais présente l'avantage de donner à l'acheteur une indication sur le travail qu'il pourra effectuer. Pour le constructeur, elle a l'inconvénient de l'obliger à prévoir son transformateur très largement, le client pouvant surcharger beaucoup la machine sans s'en rendre compte. Il serait à désirer que l'on établisse une règle pour la désignation de la puissance des machines à souder, mais le choix de celle-ci n'est pas facile. Au point de vue électrique, il serait simple d'indiquer la puissance que peut fournir le transformateur en service continu sur le plot de réglage maximum ou minimum. Cette dénomination ne permettrait peut-être pas une comparaison exacte des transformateurs au point de vue de l'utilisation en régime de soudure, mais elle aurait l'avantage de se prêter à une vérification facile. Par contre, elle aurait l'inconvénient très important de troubler complètement le client non électricien qui admettrait difficilement que sa machine absorbe, pendant la soudure, une puissance de plusieurs fois supérieure à celle indiquée comme garantie.

La puissance continue ou horaire d'un transformateur et l'échelle de tensions secondaires ne constituent pas une désignation suffisante, la chute de tension jouant un rôle important. Celle-ci (ou le courant de court-circuit) doit être mesurée non pas sur le transformateur seul, mais sur la machine montée, la longueur des connexions secondaires et la disposition des masses voisines entraînant des variations de la self inductance.

Le calcul de la chute de tension ramène à des problèmes qui ont déjà été très souvent étudiés pour d'autre applications de l'électricité, en particulier pour les fours électriques.

La construction des transformateurs de machines à souder ne diffère pas très sensiblement de celle des transformateurs de courants à basse tension.

Le secondaire n'a, en général, qu'une seule spire, il est fait, suivant les constructeurs et les modèles de machines, soit en lames souples raccordées directement aux électrodes, soit en pièces rigides, cuivre rouge ou fondu sur lesquelles viennent se fixer les lames souples de raccordement. Quelques maisons emploient des modèles spéciaux, secondaire fondu enfermant complètement le primaire, secondaire fai-

Digitized by Google

sant partie du bâti de la machine ou pièce fondue à circulation d'eau.

Le primaire porte le plus souvent des prises pour le réglage de la tension secondaire, quelquefois on emploie le couplage série parallèle des bobinages ou un transformateur de réglage placé avant. Pour de très grosses machines, on a employé des primaires formés d'un tube parcouru par circulation d'huile. On rencontre peu de transformateurs dans l'huile ou à refroidissement par ventilation.

L'appareillage électrique.

L'appareillage électrique comprend l'appareil de réglage et l'interrupteur. Il est important d'avoir du matériel robuste et ne pouvant pas donner lieu à une fausse manœuvre.

L'appareil de réglage permet de faire varier les connexions du primaire du transformateur. Certains constructeurs emploient des coupleurs à fiches qui ont l'avantage de permettre de faire des groupements série parallèle, mais qui résistent parfois mal aux manœuvres brutales. Le commutateur doit être muni de plots morts pour empêcher le court-circuit entre spires.

Il ne faut pas oublier que, par suite de l'emploi de prises sur le primaire, il peut y avoir aux plots du commutateur des tensions beaucoup plus élevées que celle du réseau. Il est intéressant de prévoir la protection de cet appareil et un bon isolement. En particulier, lorsqu'on emploie le procédé par étincelles, il se produit parfois des phénomènes de surtension qui peuvent entraîner des claquages.

On trouve quelquefois des dispositifs destinés à empêcher la manipulation du commutateur, quand l'interrupteur est fermé.

Il est impossible d'entreprendre l'énumération des modèles d'interrupteur employés, toutes les solutions connues ont probablement été essayées. Le travail à fournir par cette partie de l'appareillage est très pénible, et il faut en réduire l'entretien, très souvent ne pas compter sur de fréquentes vérifications.

Sur les machines à souder par points, le nombre de ruptures est très élevé, 1 000 à l'heure est courant, 1 500 fréquent, et on atteint 3 000.

En général, sur ces machines, l'interrupteur est commandé par le mouvement de la pédale qui fait mouvoir les électrodes, il ne faut donc pas qu'il demande un gros effort.

Les électrodes devant être en contact avec les pièces avant la fermeture du circuit primaire, on dispose en général un ressort dans la transmission de la pédale aux électrodes.

Digitized by Google

On règle l'ensemble pour que l'interrupteur ne soit fermé que lorsque ce ressort est comprimé. Quelquefois c'est la compression même du ressort qui commande l'interrupteur, ce qui facilite le réglage.

La rupture du courant primaire, qui doit être faite avant que la pression des électrodes sur les pièces n'ait cessé, se produit tout naturellement au moment convenable en lâchant la pédale.

Très fréquemment, on emploie des systèmes de commande tels que le circuit primaire se ferme avant la fin de la course de la pédale, et s'ouvre quand on continue à l'abaisser.

Ce genre de commande de l'interrupteur est très commode pour les soudures qu'on peut exécuter en un temps très court, il suffit d'appuyer à fond à vitesse convenable pour effectuer la fermeture et la rupture du circuit. Dans ce cas, on règle la tension secondaire pour que l'ouvrier appuie aussi vite qu'il le peut.

Pour les soudures de plus longue durée, ce système présente l'inconvénient de demander un arrêt en cours d'abaissement de la pédale, quelquefois difficile à obtenir; aussi, certaines machines sont-elles munies d'un système de commande de l'interrupteur permettant de travailler, soit avec la rupture au relèvement de la pédale, soit avec la rupture en fin de course.

On a cherché à rendre la soudure complètement indépendante de l'ouvrier et on a créé des interrupteurs coupant le courant automatiquement au moment convenable.

La description des différents modèles nous entraînerait trop loin, les premiers brevets en cette matière datant de 1890.

On a utilisé des appareils à temps constant, à maximum de courant, à maximum et à temps, à travail constant.

Le premier système, employé surtout dans les machines commandées au moteur, ferme le circuit pendant un temps déterminé. Le second coupe le courant lorsque l'intensité a atteint une valeur déterminée.

On a été amené à joindre à cet appareil automatique un dispositif à temps. Ce temps peut être variable suivant l'intensité utilisée ou absolument constant, mais compté à partir du moment où une intensité minimum a été atteinte. Les appareils à puissance constante comportent l'emploi d'un système wattmétrique de compteur d'où risque de complication et de trop grande fragilité.

Les interrupteurs sont commandés, soit par le courant passant dans le circuit primaire, soit au moyen d'un transformateur d'inten-

Digitized by Google

sité par le courant secondaire. Cette dernière solution paraît plus précise, mais est plus coûteuse.

Nous avons vu que les interrupteurs automatiques permettent l'exécution de soudures très rapides avec une grande pression. Ils sont donc très intéressants chaque fois qu'il est possible d'avoir la puissance nécessaire pour employer ce procédé, et lorsqu'on exécute des travaux de série. Sur du métal propre, le fonctionnement des appareils bien construits est très régulier. Sur du métal sale, la différence de surface utile des points de contact peut provoquer des irrégularités. Ces appareils demandent un entretien un peu plus soigné que les autres, et un réglage préalable parfois difficile à obtenir. Il semble qu'il y a encore des recherches à faire pour rendre ces appareils plus robustes et faciles à régler.

Dans les machines à souder par bout, la fréquence des soudures est en général moins grande, la mise en place des pièces étant plus longue.

Par contre, on construit couramment des machines où les interrupteurs ont à couper d'assez grandes puissances, 100 et 200 kVA.

L'interrupteur est commandé, soit par une pédale, soit à la main; assez souvent la fermeture est entraînée par le mouvement du levier de compression. Le système peut être rendu automatique en employant les mêmes interrupteurs que ceux qui sont utilisés pour la soudure par points. L'intensité augmentant en général en fin de soudure, on peut même utiliser simplement un interrupteur à maximum.

On utilise très souvent la variation de la résistance mécanique du métal pour déterminer le moment de rupture. En comprimant la soudure sous une pression déterminée, on peut admettre que le refoulement indique la température et par suite faire commander l'interrupteur par le déplacement du chariot portant les mâchoires. Ce système donne des résultats très réguliers, à condition de choisir convenablement les vitesses de chauffage. Pour maintenir la pression constante, on emploie des ressorts ou des contrepoids armés avant la soudure et fournissant le travail ou limitant l'effort transmis.

Modes de branchement des machines.

Les règlements des Compagnies de distribution d'électricité, interdisent le branchement sur une seule phase d'une puissance supérieure à quelques centaines de watts, imposent aux appareils d'utili-

Digitized by Google

sation un courant de démarrage qui ne dépasse pas d'un certain pourcentage le courant normal, et fixent un minimum de consommation proportionnel au maximum de puissance demandé.

Les machines à souder par résistance ne peuvent utiliser que du courant monophasé, la puissance qu'elles absorbent passe continuellement d'une valeur assez élevée à zéro, et leur consommation réelle est assez faible si on la rapporte au maximum instantané de puissance absorbée.

Elles ne sont conformes aux règlements que sur un point, le facteur de puissance de la plupart des machines modernes est assez élevé.

Il est assez compréhensible que les Compagnies de distribution aient quelques hésitations à accepter le branchement de ces appareils. La plupart d'entre elles, il faut le reconnaître, mettent beaucoup de bonne volonté et de tolérance dans l'examen des demandes, quelques-unes, cependant, n'y apportent pas l'esprit que devrait avoir un fournisseur vis-à-vis d'un client. Cet état d'esprit porte un préjudice sérieux au procédé de soudure électrique. Il y a en France actuellement un nombre important d'industriels qui n'emploient pas ce procédé, parce que la Compagnie d'électricité leur a refusé de fournir du courant, ou leur impose des conditions trop onéreuses, tri-monophasé, poste haute tension, ou minimum forfaitaire élevé.

Il est possible que, dans certains cas, le branchement d'une machine à souder ne soit pas rémunérateur pour la Compagnie. Mais il ne faut pas oublier que, en empêchant un client d'utiliser un procédé nouveau, la Compagnie risque de se priver de beaucoup d'autres clients analogues qui arrivent à être intéressants et même de ralentir partiellement le mouvement d'extension des emplois de l'électricité.

La soudure électrique a certainement rendu plus de services à la propagande de l'électricité, qu'elle n'a nui aux distributions de courant.

Nous n'avons jamais entendu parler de difficultés dues aux machines sur des réseaux même d'assez faible importance, mais nous connaissons beaucoup d'industriels qui, ayant été amenés à prendre un branchement pour une soudeuse, l'ont utilisé pour des moteurs, ou ont installé des fours ou des chauffe-rivets électriques, qui sont pour le marchand de courant fort intéressants.

La plus grande difficulté provient en général du branchement en monophasé.

Bien que la plupart des réseaux aient des charges monophasées et des déséquilibrages aussi importants que ceux que peuvent créer les

Digitized by Google

machines à souder courantes, beaucoup de Compagnies refusent absolument l'autorisation du branchement sur les distributions basse tension. Elles exigent en général que le client établisse un poste haute tension, ou installe un transformateur tri-monophasé.

Nous n'insisterons pas ici sur les résultats que peut donner ce dernier appareil, fort heureux que quelques secteurs aient encore des illusions sur ce qu'on peut en attendre, et permettent ainsi l'emploi des machines à souder. Nous devons toutefois avouer que nous nous sommes permis, chaque fois que nous l'avons pu, de tenter une petite expérience; la suppression pendant quelques jours du transformateur tri-monophasé; jamais personne ne s'en est aperçu. Cela nous paraît prouver que le branchement en monophasé ne présenterait pas grand inconvénient.

L'irrégularité de charge provoque deux objections, l'une technique, l'autre commerciale. On peut redouter que des pointes si brusques ne produisent des troubles sur les circuits d'éclairage. Cela ne se produit que lorsque les lignes sont déjà trop chargées, et dans ce cas, l'intérêt bien compris du secteur n'est-il pas le plus souvent d'aller au-devant de la consommation et de renforcer ses lignes ? La chute de tension coûte cher, par les pertes et par la réduction de puissance absorbée. Cette difficulté peut d'ailleurs être évitée en imposant des heures d'emploi de la soudure, ce que les clients acceptent assez facilement.

Au point de vue commercial, il est évident que si on exige l'application des règles habituelles, fixant un rapport assez faible entre le maximum de demande et la puissance du branchement, on aura un rendement déplorable, ou on imposera au client un minimum trop onéreux. Sur ce point, les Compagnies sont en général très libérales, fort heureusement pour les possesseurs de machines à souder.

Si ce régime irrégulier ne crée pas de difficultés sur les réseaux, même de faible importance, il n'en est pas de même pour les installations privées de force motrice. Les régulateurs de turbine à eau, ou de moteurs à gaz, à moins d'avoir à côté une charge fixe importante, ne peuvent suivre des variations aussi rapides.

Les alternateurs de petite puissance qu'on est amené à employer dans de telles installations, ont une chute de tension très élevée, qui ralentit considérablement la soudure, ou oblige à laisser monter la tension à vide à une valeur très élevée.

La même difficulté se présente lorsqu'on ne dispose que de courant

Digitized by Google

continu. Les commutatrices paraissent résister assez mal à ce régime irrégulier, nous avons vu assez souvent des accidents au collecteur. L'emploi de groupe convertisseur oblige à prévoir un alternateur beaucoup trop puissant, au point de vue échauffement, pour ne pas avoir trop de chute de tension.

Les applications.

Il serait trop long et fastidieux d'énumérer toutes les applications de la soudure électrique par résistance. La liste n'en serait d'ailleurs pas complète, chaque jour amenant un emploi nouveau.

La recherche continuelle de la réduction des frais de fabrication amène les industriels à s'intéresser de plus en plus à ce procédé. Malgré le prix élevé de la calorie électrique, le prix de revient de la soudure électrique est très bas, on peut même la plupart du temps, considérer que la dépense de courant est négligeable par rapport aux autres frais de fabrication. Il est d'ailleurs très difficile de donner des indications précises sur la consommation. Nous avons vu que, suivant la façon dont on opérait, on pouvait, dans la soudure par rapprochement, concentrer plus ou moins l'échauffement de la pièce, et dans certains cas, le réduire à une couche de faible épaisseur. L'énergie absorbée dépend évidemment de la masse de métal chauffée et peut, par suite, varier de façon importante. Parmi les nombreux facteurs que nous avons énumérés et qui entrent en jeu dans le choix de la façon d'opérer, la nature de la coupe sera ici le point dominant. Si on désire souder des pièces qui ont été cisaillées, il faudra prévoir l'échauffement et le refoulement d'une longuur au moins égale au biseau possible, ce qui entraînera une consommation d'énergie beaucoup supérieure à ce qui est nécessaire.

Il en est de même pour la soudure par points, la vitesse de soudure et la surface de contact des électrodes entraînent des variations considérables.

La dépense de main-d'œuvre, temps passé pour la soudure, peut également varier, comme nous l'avons vu, d'après la puissance mise en jeu. Dans beaucoup de cas, c'est le temps nécessaire à la manipulation des pièces qui représentera la partie la plus importante du coût de la soudure.

Les machines à distribution automatique, machine à chaîne par exemple, réduisent encore cette dépense et permettent d'atteindre des productions élevées.

Cette possibilité d'obtenir un prix de revient très bas permet d'em-

Digitized by Google

ployer la soudure électrique à un grand nombre de travaux. En dehors des cas où on remplace ainsi d'autres procédés de soudure (chaînes, roues, etc.) on peut citer, parmi ceux qui demandent un faible prix de revient, la récupération des chutes de barres ou la soudure de deux aciers de composition différente, ou de deux métaux (nickel, cuivre, laiton, acier). On a aussi recours à ce procédé pour la fabrication de pièces mécaniques, dont la forge et l'usinage seraient trop compliqués si elles étaient prises d'une seule pièce et qui, faites en plusieurs parties, peuvent être obtenues facilement.

La machine à souder par rapprochement est, de plus, très souvent employée comme une véritable machine à forger pour exécuter des refoulements ou des pliages.

La soudure par points remplace surtout le rivet dans ses très nombreuses applications, et naturellement les autres procédés de soudure. Par rapport au rivet elle présente, en dehors de l'économie, l'avantage de ne pas prendre de jeu par les efforts et les vibrations et de ne pas laisser de tête apparente.

La soudure par chauffage indirect.

Le procédé Thomson est utilisé, non seulement pour faire des soudures sans apport de métal, mais aussi pour faire des soudures à l'étain ou des brasures.

Dans ces applications où la liaison est faite par un métal liquide, il n'est pas nécessaire de faire agir une pression importante sur les pièces, et la température à atteindre est en général moins élevée. Par contre, on est souvent gêné par la nécessité d'apporter le métal de soudure et d'égaliser la température des différentes parties. On a donc été amené à produire la chaleur nécessaire, non pas seulement par le passage du courant dans les pièces, mais par l'échauffement des électrodes de contact faites en charbon ou en métal spécial.

On a utilisé différents dispositifs, suivant le travail, avec des blocs, des pointes, des pinces, en charbon ou en métal résistant, soit d'un côté seulement, soit des deux côtés des pièces à souder. La résistance du charbon étant beaucoup plus élevée que celle du métal, on a pu employer des tensions plus élevées, et des intensités moins grandes, ce qui facilite la manipulation des appareils.

Pour de petits travaux, un crayon de charbon relié par un câble souple à une borne d'un transformateur, tandis que l'autre borne est reliée à une pièce ou à une table, constitue un outil d'un emploi commode.

Digitized by Google

La pointe de charbon, portée rapidement à haute température, fournit la chaleur nécessaire pour faire des brasures, en permettant de localiser l'échauffement et d'éviter le recuit des pièces sur une grande surface.

A côté de ce petit appareil utilisé dans la bijouterie et la construction électrique, on a construit des machines plus complètes, analogues aux machines à souder et permettant le travail sur montages. On a fait également des appareils automatiques, fonctionnant de la même façon tels que ceux qui sont utilisés dans la fabrication des piles de T. S. F., qui soudent le fil, sur les tubes en zinc, à raison de 35 pièces à la minute.

Des machines plus grosses sont utilisées pour la construction mécanique, bicyclette par exemple et dans la construction électrique.

Une des plus curieuses applications du chauffage indirect est un procédé de soudure de joints de rails. Les deux extrémités des rails étant légèrement écartées, on forme tout autour une cuvette en matière réfractaire analogue aux moules utilisés dans la soudure aluminothermique. On coule dans ce moule des sels fondus, et on fait passer le courant avec une tension assez élevée. Le sel fondu, formant conducteur résistant, s'échauffe entre les deux extrémités de rails et communique sa chaleur au métal. Lorsque celui-ci a atteint une température suffisante, on rapproche les deux rails avec une forte pression et on coupe le courant. Ce procédé a, paraît-il, permis d'obtenir des soudures parfaites, exécutées en milieu désoxydant, en mettant en jeu une puissance relativement faible.

Cette revue rapide des procédés de soudure par résistance, n'a pas la prétention d'être complète ou de présenter des résultats nouveaux. Nous avons essayé d'énumérer les principaux problèmes qui font naître l'emploi de ces procédés et la construction des machines. On voit qu'ils mettent en jeu des questions très différentes de métallurgie, d'électricité et de mécanique.

La plupart des études publiées à ce sujet ne séparent pas suffisamment ces trois points, et par suite ne donnent pas des indications suffisantes, pour analyser les résultats. Nous nous sommes efforcés de faire un classement peut-être discutable, mais que nous espérons utile.

Digitized by Google

Digitized by Google

L'ARC ÉLECTRIQUE DE SOUDURE

par M. Brillié.

Chef des services techniques de la Soudure Autogène française

---

Matériel électrique utilisé : en courant continu ; en courant alternatif. — Applications : soudure ou fonderie ? soudure électrique ou soudure au chalumeau ? procédés Langmuir et Alexander.

Le matériel électrique utilisé pour son alimentation et les applications de la soudure électrique à l'arc.

L'arc électrique présente au point de vue soudure des caractéristiques qui diffèrent de l'arc généralement étudié par les électriciens.

Ces caractéristiques dépendent des électrodes, d'une part, et de la nature du courant, d'autre part.

Les soudeurs ont créé des images « arc dur », « arc doux », « arc qui crache », « arc qui accroche »..

Ces qualités ou défauts de l'arc métallique, correspondent à des qualités ou à des défauts de la source de courant ou des électrodes.

L'expérience a prouvé qu'il faut des circuits spécialement étudiés pour produire un arc de soudure bien approprié.

Avant d'étudier le matériel électrique utilisé pour l'alimentation des arcs de soudure, il est donc nécessaire de se rendre compte en quoi ils diffèrent exactement des autres arcs industriels.

I. — Courant continu.

Les études sur l'arc alimenté en courant continu ont porté généralement sur des courants de faible intensité, jaillissant entre des charbons ou des électrodes dont l'état variait peu au cours de l'expérimentation.

Dans le cas des fours électriques, les intensités employées sont considérables, mais les électrodes sont de dimensions telles que le phénomène se trouve avoir une certaine stabilité dans le temps.

Digitized by Google

En soudure électrique, au contraire, on cherche à obtenir la fusion de l'électrode et de la pièce à souder à l'aide de très fortes densités de courant. Au phénomène électrique se superpose un phénomène métal-

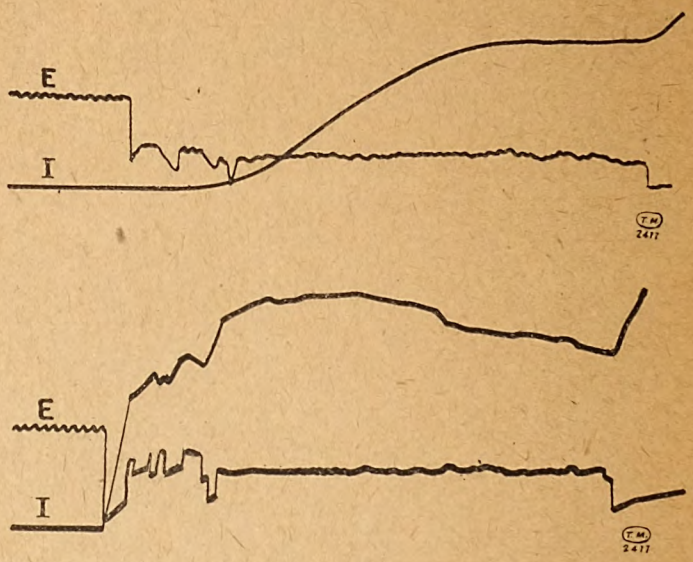


Fig. 1. — Oscillogramme de l'établissement du régime de soudure.
E tension; I intensité avec et sans bobine d'inductance.

lurgique de fusion, qui entraîne des perturbations dans le circuit de soudure et empêche l'établissement d'un régime stable.

L'étude de ces perturbations ne peut se faire qu'à l'aide d'un oscil-

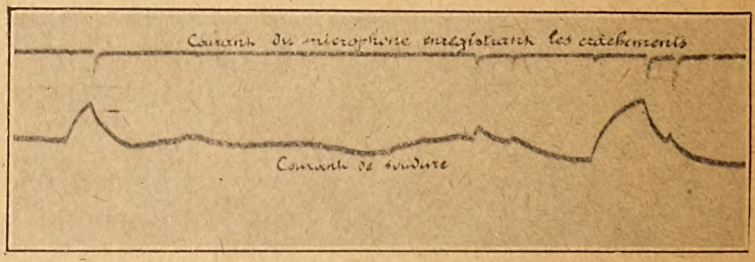


Fig. 2. — Oscillogramme de l'intensité du courant de soudure et du courant d'un microphone sensible au bruit de l'arc.

logramme, car les phénomènes de fusion et de dépôt du métal sont très rapides. Ce sont ces variations d'intensité du courant continu dans l'arc de soudure qui expliquent l'emploi paradoxal d'une bobine de self inductance en série dans un circuit de courant continu.

Deux oscillogrammes relevés sur la même machine, avec et sans

Digitized by Google

bobine de self inductance, montrent l'influence de celle-ci sur les variations d'intensité du courant à l'allumage de l'arc (fig. 1).

On a, d'autre part, cherché à lier cette notion précise et mesurable des variations de courant avec les locutions imagées créées par les soudeurs. On a pu démontrer scientifiquement, d'une manière très simple, que tout crachement de l'arc correspond à une pointe du courant de soudure. Un des équipages d'un oscillographe enregistrait le courant de soudure, l'autre le courant d'un microphone, placé dans le voisinage de l'arc et était sensible au bruit qui accompagne toujours les crachements d'un arc métallique. Les pointes de chacune des courbes se correspondent (fig. 2).

Matériel électrique utilisé pour l'alimentation de l'arc de soudure en courant continu.

Ce matériel doit répondre aux caractéristiques suivantes :

1° Tension à vide suffisamment élevée pour permettre un allumage facile de l'arc.

Cette tension a été fixée expérimentalement aux environs de 50 V.

2° Dispositif permettant le réglage du courant, la tension aux bornes de l'arc en charge pouvant varier de 18 à 30 V, suivant le type d'électrodes employé.

3° Dispositif permettant d'éviter les pointes de courant dues aux variations de tension de l'arc, produites par les gouttes de métal se détachant des électrodes en fusion; ceci afin d'éviter les crachements de l'arc.

Une longue expérience d'atelier et celle d'une soudure exécutée pendant la guerre, avec une batterie d'accumulateurs de sous-marin avaient prouvé qu'en se plaçant uniquement au point de vue « soudeur », la meilleure source de courant était une source à tension constante, batterie d'accumulateurs avec résistance ohmique et inductance intercalées dans le circuit de soudure.

Cette solution est encore employée, mais étant données les pertes d'énergie dues à la présence de la résistance additionnelle, on a cherché à réaliser des génératrices spéciales, permettant d'éliminer cette résistance.

M. Bethenod, dans un article paru dans le numéro d'avril 1927, du Bulletin de la Société Alsacienne de constructions mécaniques, a fait un historique de la question depuis la génératrice de Marcel Deprez décrite dans la *Lumière Electrique* du 3 décembre 1881 (page 331),

Digitized by Google

jusqu'aux machines actuelles en passant par la dynamo allemande de KRAMER.

M. BETHENOD fait clairement ressortir dans cet article, que si les caractéristiques *statiques* de ces machines sont convenables pour la soudure et peuvent être équivalentes à des accumulateurs sur une résistance, il n'en est pas de même des caractéristiques *dynamiques* dues aux variations de courant déjà signalées, qui tiennent à la nature même de l'arc de soudure; on ne peut négliger les « phénomènes transitoires ».

L'établissement de chaque régime dans les divers circuits demande un temps appréciable, et le flux inducteur de la machine ne peut suivre instantanément les fluctuations de débit qui tendent inévitablement à se produire en cours du fonctionnement. Cette impossibilité est due principalement à l'induction mutuelle qui s'exerce entre l'enroulement excité séparément et les autres enroulements.

Le premier, qui devrait par définition être parcouru par un courant absolument constant est, en réalité, à chaque variation du régime de l'arc, le siège d'un courant indirect parasite dont les ampèretours s'opposent à toute variation rapide du flux inducteur de la machine.

Celui-ci ne peut donc s'ajuster immédiatement au nouveau régime et finalement on vérifie expérimentalement qu'une génératrice fournissant une caractéristique idéale lorsqu'elle débite sur une résistance lentement variable, donne souvent lieu à des à-coups de débit tout à fait fâcheux en cours de soudure.

En partant de ces bases générales, plusieurs solutions ont été mises au point, dont les deux plus originales sont l'une française et l'autre américaine.

La première est celle de la dynamo à courant limité de la Société Alsacienne de constructions mécaniques, la seconde est celle de la génératrice G.E.C°, établie par la General Electric Company de Schenectady.

Génératrice de la Société Alsacienne.

Dans cette génératrice, la chute de tension en charge est due à la réaction d'induit dont l'action est renforcée par un enroulement inducteur série démagnétisant. Une excitatrice, montée en bout d'arbre, assure l'alimentation des enroulements inducteurs magnétisants et le réglage du courant de soudure s'opère très simplement en agissant sur le calage des balais.

Digitized by Google

Un petit transformateur auxiliaire (fig. 3) possède un enroulement gros fil monté en série sur l'induit de la machine, cet enroulement remplace la bobine de self-inductance habituelle.

Il permet de supprimer l'induction mutuelle produite en régime

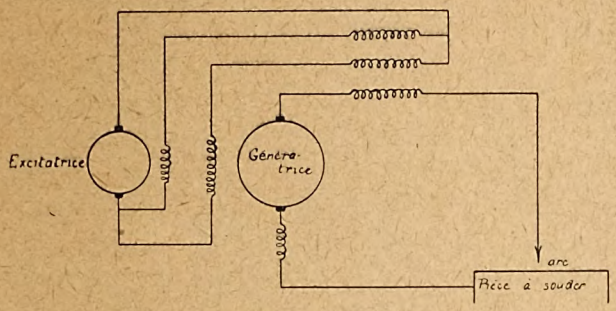


Fig 3. - Génératrice S. A. C. M.

variable entre les circuits induits et inducteurs en ajoutant sur le transformateur deux petits enroulements fil fin montés respectivement

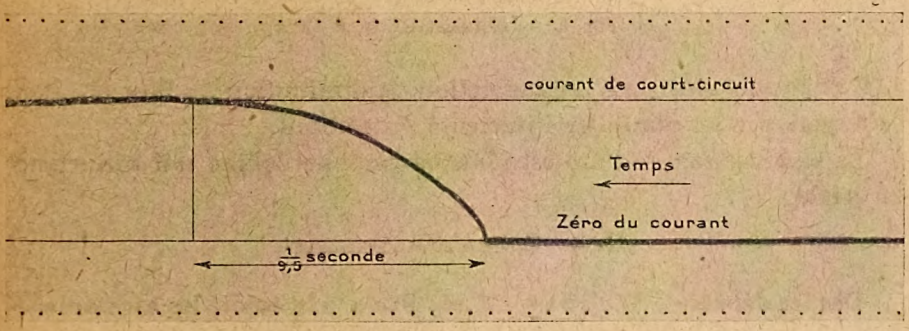


Fig. 4. — Etablissement du courant lors de la mise en court-circuit de la génératrice S. A. C. M. Le courant prend progressivement sa valeur, alors que dans certaines machines la mise en court-circuit donne lieu à une pointe pouvant atteindre 2,5 fois la valeur du courant de court-circuit.

en série dans les circuits inducteurs de la génératrice et de l'excitatrice.

Toute fluctuation dans les courants inducteurs est ainsi évitée (fig. 4).

Génératrice G.E.C°.

Cette génératrice, complètement décrite dans la General Electric Review de février 1925, est une machine bipolaire dont chaque pôle

Digitized by Google

est constitué par deux masses polaires à angle droit créant deux flux indépendants à angle droit $\overline{OM}$ et $\overline{OC}$. (fig. 5).

Le flux $\overline{OM}$ est rendu sensiblement invariable par saturation des masse polaires correspondantes. Il en résulte une tension constante entre les points A et B qui sert à l'excitation de la machine.

Le flux $\overline{OC}$ au contraire varie sous l'influence de la réaction d'induit, qui est représentée par le vecteur $\overline{OR}$ dirigé suivant les balais AC. La composante de $\overline{OR}$ suivant $\overline{OC}$ tend à s'opposer à ce flux. Cette composante est plus ou moins grande, suivant l'orientation des balais

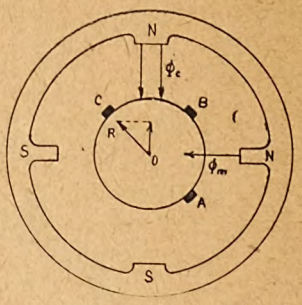


Fig. 5. — Génératrice G. E. C°.

AC et permet ainsi, par augmentation ou diminution du flux résultant d'augmenter ou diminuer l'intensité du courant.

La stabilisation de l'arc est obtenue par une bobine self inductance spéciale.

II. — Courant alternatif.

Dès les débuts de l'éclairage, M. A. Blondel a étudié les arcs en courant alternatif et a fait ressortir le rôle joué par l'inductance du circuit.

(Voir *Lumière Electrique*, 16-23-30 septembre 1893). Tous les essais de laboratoire tendaient à prouver que l'arc de soudure en courant alternatif entre une électrode et une pièce parfaitement polies ne peut pas s'amorcer aux tensions et fréquences industrielles.

Des essais que nous avons eu l'occasion de faire, montrent qu'avec des courants à haute fréquence, il serait possible de l'amorcer facilement, mais le problème, primitivement considéré comme insoluble, de la soudure en courant alternatif, a été résolu, beaucoup plus simplement, par les électrodes enrobées.

Les électrodes que l'on utilise pour la soudure ne sont pas, en effet, composées par un fil métallique nu, mais par un fil métallique en-

Digitized by Google

robé, soit dans une pâte (brevet KJELLBERG), soit dans un fil d'amiante trempé dans des solutions chimiques (brevets quasi-arc), soit par un procédé mixte utilisant un fil d'amiante enroulé en spirale ayant un pas d'environ 5 m/m, et une pâte (brevets A.W.P.).

Ces différentes solutions permettent de modifier l'atmosphère dans laquelle l'arc jaillit, l'enrobage se volatilise, ses vapeurs permettent l'allumage et augmentent la stabilité de l'arc.

Ces produits, d'autre part, en se mélangeant au métal en fusion, permettent d'améliorer la qualité du métal déposé, et même de la transformer complètement.

L'arc électrique devient un petit four de métallurgie, et c'est ainsi qu'avec certaines électrodes, en partant d'acier doux, on arrive à déposer de l'acier à 13 pour cent de manganèse, de l'acier Stainless, de l'acier auto-trempant, de l'acier au carbone, qui sont élaborés par les produits de l'enrobage dans l'arc de soudure lui-même.

Nous n'insisterons pas sur ce point qui ressort du domaine de la métallurgie, pour reprendre la question électrique de l'allumage de l'arc en courant alternatif.

Les premiers enrobages permettaient l'allumage de l'arc avec du courant à 50 p : s sous une tension de 80 V à vide, la tension aux bornes de l'arc étant d'environ 20 V.

Il était donc nécessaire de prévoir dans le poste de soudure, soit une résistance, soit une réactance importante.

Par des études systématiques (1), nous sommes arrivés à déterminer des produits qui permettent l'allumage à des tensions très inférieures, et, à l'heure actuelle, au laboratoire, nous pouvons allumer des arcs en alternatif à 30 V, la tension aux bornes de l'arc étant de 25 V environ.

On comprend facilement l'intérêt de ces études. Un calcul rapide montre, en effet, que les électrodes qui pourraient s'allumer à 30 V permettraient, soit une économie de courant watté de 60 pour cent environ, si le réglage s'opère par une résistance, soit une amélioration du facteur de puissance qui pourrait être relevé à 0,8 si le réglage s'effectuait par une self inductance.

Matériel électrique utilisé pour l'alimentation de l'arc de soudure en courant alternatif.

Arcs monophasés. — L'étude générale des conditions de fonctionne-

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 5 avril 1905.

Digitized by Google

ment d'un poste de soudure monophasé a été faite par M. Bethenod, et publiée dans le Bulletin de la Société Alsacienne de constructions mécaniques de janvier 1926.

Nous en rappelons la formule fondamentale :

$$\eta s \cos \varphi = 1$$

$$s \text{ — Coefficient de stabilité} = \frac{\text{Tension à vide}}{\text{Tension de l'arc}}$$

(variable suivant les électrodes).

$$\eta. \text{ — Rendement électrique du poste} = \frac{\text{Puissance absorbée par l'arc}}{\text{Puissance absorbée par le poste}}.$$

Avec un coefficient de stabilité donné, toute augmentation du rendement correspond donc à une diminution du cos φ *et réciproquement.*

On doit essayer par suite de diminuer le coefficient de stabilité s, soit en diminuant la tension à vide nécessaire pour obtenir un bon allumage, soit en modifiant les caractéristiques de l'électrode.

La tension à vide peut être diminuée par l'emploi du poste à étincelle pilote (1), inventé par M. Bethenod, qui consiste à utiliser une étincelle auxiliaire à haute fréquence dite « étincelle pilote » qui, jaillissant entre l'électrode et les pièces à souder, prépare le passage de l'arc par une forte ionisation de l'air.

Il est cependant beaucoup plus intéressant d'améliorer le coefficient de stabilité s par l'électrode car, dans ce cas, tous les postes de soudure, quels que soient leurs principes, bénéficient de l'amélioration.

On peut envisager à l'heure actuelle, que ce coefficient est égal, avec les électrodes de la soudure autogène française, à

$$\frac{50}{20} = 2{,}5$$

et cette Société a mis au point, dans son Laboratoire, des électrodes dont le coefficient de stabilité est de

$$\frac{40}{30} = 1{,}3.$$

Le problème de soudure en courant alternatif monophasé est donc avant tout un problème d'électrode, et les caractéristiques optima des postes dépendent des caractéristiques des électrodes.

Arcs polyphasés. — L'emploi des arcs polyphasés pour la soudure a été proposé par M. Bethenod (2) qui cherchait à réaliser un poste de soudure équilibrant les phases d'une distribution polyphasée.

---

(1) *Bulletin S. A. C. M.* Avril 1926 n° 14.
(2) *Bulletin S. A. C. M.* Octobre 1926.

Digitized by Google

Le principe consiste, essentiellement, dans l'emploi de deux électrodes côte à côte reliées, soit chacune à une phase d'une distribution triphasée, la pièce étant reliée à la troisième phase, soit chacune à une phase d'une distribution diphasée trois fils, le troisième fil étant relié à la pièce.

C'est cette solution qui a été adoptée dans les postes dits « sandwich ». L'électrode est constituée par deux âmes métalliques isolées et liées par l'enrobage, et le soudeur se trouve dans les conditions de

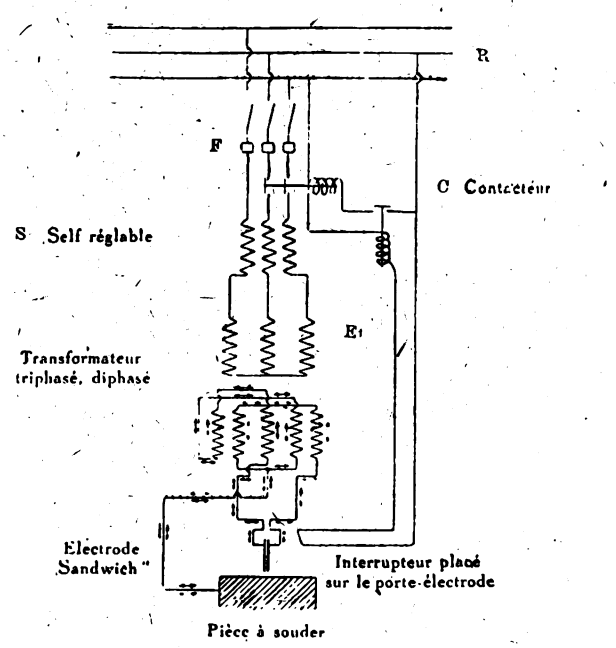


Fig. 6. — Schéma complet d'un poste de soudure par arc diphasé utilisant des électrodes doubles " Sandwich " (alimentation triphasée).

deux ouvriers qui travailleraient chacun sur une phase au même point d'une pièce avec deux électrodes identiques et la même intensité de courant.

D'une part, ce dispositif permet d'équilibrer les phases; d'autre part, du fait de l'arc diphasé, le poste peut fonctionner à une tension très basse avec une très bonne stabilité de l'arc double, ce que l'on explique facilement, car les deux courants sont décalés de 90° dans chacun des arcs; quand le courant est nul dans l'un des arcs, il est donc maximum dans l'autre. Il s'établit une sorte de compensation qui entraîne une stabilité remarquable de l'arc diphasé, les arcs s'allumant d'ailleurs mutuellement, à tour de rôle.

La figure 6 donne le schéma complet d'un poste triphasé-diphasé.

Digitized by Google

La transformation du courant triphasé du réseau en courant diphasé, est réalisée au moyen du montage imaginé il y a une trentaine d'années par Maurice Leblanc.

Le réseau R est relié au primaire E_1 du transformateur Leblanc, par l'intermédiaire des fusibles F du contacteur C et de la bobine de réactance réglable S, qui se trouve insérée dans le circuit primaire.

Le réglage du courant de soudure s'opère en faisant varier l'entrefer de la réactance par un volant.

Le contacteur, commandé par un commutateur placé sur le masque du soudeur, permet d'arrêter le fonctionnement du poste pendant les pauses et les changements d'électrodes.

La pince porte-électrode assure les contacts aux extrémités de l'électrode double, aussi simplement qu'une pince porte-électrode ordinaire avec une électrode simple.

On peut envisager que, dans l'avenir, l'application directe du courant polyphasé à la soudure conférera à l'installation des propriétés tout aussi remarquables que celles résultant de son usage dans les autres domaines bien connus de l'Electrotechnique.

III. — Applications de la soudure électrique a l'arc.

Travaux d'assemblages.

Les travaux d'assemblages par fusion et liaison homogène des tôles, sont évidemment les travaux types de soudure électrique à l'arc. Ils sont trop nombreux et trop connus pour les décrire et nous nous contenterons de citer les suivants :

Réparations de chaudières. — Soudure des cassures sur les faces planes des plaques tubulaires et fonds de boîte à feu. Cassures dans le voisinage des bagues de rivet.

Grosse chaudronnerie. — Construction de réservoirs, de gazomètres dont certains atteignent 85 000 m^3, wagons réservoirs pour le transport du chlore liquide sous pression.

Constructions navales. — Navires entièrement soudés. La Maison Solvay a en service depuis plusieurs années un chaland de mer de 45 m de long, 10 m de large pour le transport de la soude en vrac.

L'étanchéité à la soude ne peut pratiquement s'obtenir que par soudure.

Sur ce navire, 5 500 m de soudure en tôles de 10 mm n'ont jamais donné lieu à une fuite.

Digitized by Google

Chemins de fer. — Construction de croisements et d'appareils de voies en rails assemblés par soudure.

Il nous paraît plus intéressant d'insister sur les tendances actuelles de la soudure à l'arc, que de poursuivre cette énumération.

A l'heure actuelle, la fusion par l'arc devient, non plus un but, mais un moyen, en ce sens qu'on voit, au cours de ces dernières an-

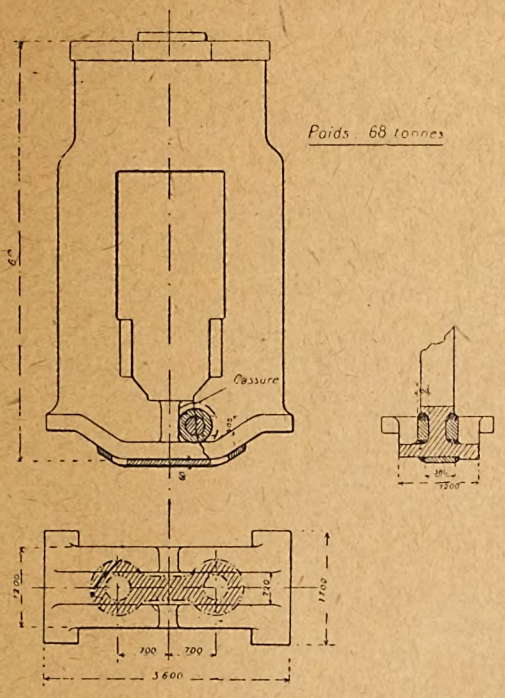


Fig. 7. — Schéma de la réparation d'une cage de laminoir de 68 T.

nées, des travaux de réparation par liaison hétérogène dont le type est la réparation d'une cage de laminoir de 68 T.

La pièce réparée devait résister à deux sortes d'effets : efforts de cisaillement verticaux, compensés par la présence de deux plaques d'acier circulaires de 200 mm d'épaisseur et de 400 mm de diamètre. Ces plaques sont soudées au bâti de fonte à l'arc avec des électrodes d'acier. Des goujons sont vissés dans la fonte pour assurer l'adhérence de l'acier rapporté; efforts transversaux compensés par une pièce de forme soudée de même.

Réparation du Pont de Suresnes. — Ce travail est un exemple typique d'assemblage hétérogène, dans lequel les joints ont été réalisés par soudure autogène.

Digitized by Google

Un des voussoirs du pont avait été cassé et son remplacement aurait nécessité un échafaudage permettant de soutenir tout l'arc de rive; cet échafaudage aurait empêché la navigation pendant toute la durée des travaux.

On mit en place une pièce fondue épousant la forme de la cassure. Cette pièce, destinée simplement à conserver l'esthétique du pont, fut soudée électriquement avec des électrodes en acier.

La continuité des efforts fut assurée par une armature en fers plats entretoisés soudée à l'arc électrique, d'une part sur la pièce rapportée, d'autre part, sur la partie du voussoir restée en place.

A l'occasion de cette réparation, on peut signaler les travaux effectués actuellement par la Compagnie des Chemins de Fer P.L.M., sur certains ponts en fonte.

Ils consistent à réparer les fissures des voussoirs par soudure électrique à l'arc avec électrodes en acier, avant l'enrobage du pont dans du béton. L'arc électrique est employé de préférence au chalumeau, car il est indispensable d'employer un procédé n'entraînant pas d'effets de dilatation. D'autre part, les pièces ne travaillant qu'à la compression, la résistance donnée par une simple ligne de soudure est jugée suffisante.

Il y a lieu d'ajouter que, dans ce cas, la soudure ne joue qu'un rôle accessoire, la solidité du pont étant assurée par une dalle en ciment réunissant les tympans, et une autre dalle placée à l'intrados des arcs; on ne table pas sur la soudure pour les calculs de résistance. Mais cette application en déterminera d'autres, où la soudure jouera véritablement le rôle qui lui revient.

La réussite de ces travaux ouvre aux vues audacieuses de cette conception nouvelle de l'assemblage réalisé par soudure, des perspectives illimitées.

Soudure ou fonderie ?

Si, dans le domaine des réparations, la France semble avoir réalisé les travaux les plus audacieux par des conceptions complètement nouvelles, dans le domaine de la construction l'Amérique tient la tête et il est particulièrement intéressant d'étudier l'effort fait par les Américains pour le remplacement de la fonte par des assemblages soudés.

Avec la largeur de vue qui caractérise l'industriel américain, M. W. L. Warner expose qu'il ne s'agit pas d'éliminer la fonderie de l'industrie, mais « d'améliorer les méthodes de production, de diminuer

Digitized by Google

les prix de revient et de vente pour en faire bénéficier la société », car l'individu profite de tout ce qui aide la collectivité de l'industrie.

L'idée de remplacer les pièces de fonderie par des assemblages soudés n'est pas nouvelle. Il est intéressant de noter qu'elle a été appliquée en France à des blocs moteurs d'automobiles. Ce serait certainement la dernière application qui serait venue à l'idée d'un Américain, et ceci prouve une fois de plus que l'on ne peut songer à trans-

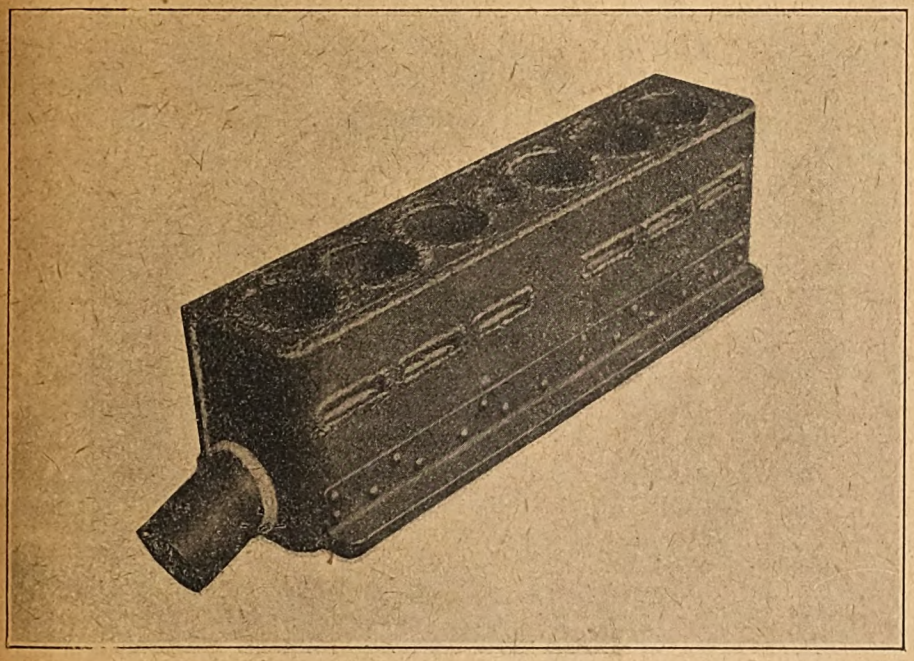


Fig. 8. — Bloc moteur Voisin en acier, entièrement soudé à l'arc.

porter brutalement d'un pays dans l'autre des méthodes ou des procédés de fabrication qui dépendent du marché intérieur.

Pour des voitures de luxe construites en petites séries, comme la Farman ou la Voisin, le bloc moteur soudé peut avantageusement remplacer le bloc en fonte (fig. 8). On ne peut le concevoir pour la Ford, la Chevrollet ou même la Packard construites en grandes séries.

N'est-il pas curieux de penser que ce remplacement de blocs fondus par des assemblages soudés, qui constitue peut-être l'application la plus difficile du remplacement de la fonte par des assemblages soudés, ne se soit pas étendu en France à des pièces plus simples et qu'il faille maintenant découvrir en Amérique tout le parti que l'on peut tirer de semblables applications ?

Digitized by Google

En susbtituant des produits laminés aux produits coulés, l'industrie suit l'évolution naturelle de l'histoire de la métallurgie. Elle baisse ainsi les prix de revient tout en améliorant les qualités physiques des produits manufacturés.

La soudure, procédé de réparation, devient un procédé de fabrication et pour reprendre la formule américaine « Save money and

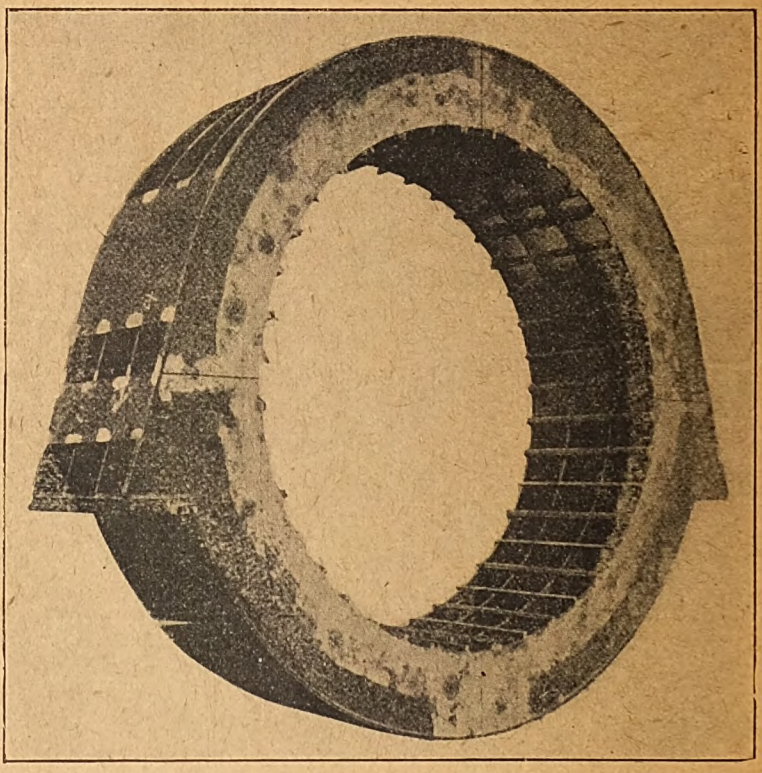


Fig. 9. — Carcasse d'un alternateur synchrone de 6 m de diamètre, entièrement construite par soudure suivant schéma n° 3.

time », nous pouvons dire que les économies de temps et d'argent qui pourraient en résulter pour des industriels conscients de leurs intérêts seraient considérables, à condition qu'à ce procédé nouveau correspondent des conceptions nouvelles.

Il faut étudier des dessins nouveaux et, si l'on n'enlève pas de sa « créance toute idée préconçue », on n'aboutira qu'à une copie imparfaite de ce qui existe, alors qu'il faut créer une science nouvelle de l'assemblage.

Cette science ne peut être créée que par la collaboration du soudeur

Digitized by Google

avec les industriels, le soudeur seul connaît le problème de la contrac-

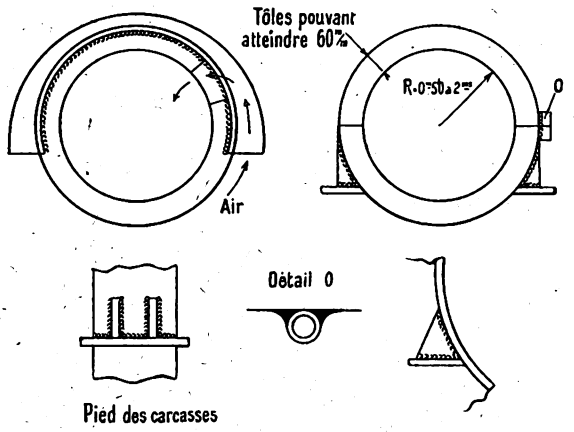


Schéma de soudure d'une carcasse de moteur à courant continu. — Les carcasses des petits moteurs sont constituées par une tôle roulée; celles des gros moteurs pouvant atteindre jusqu'à deux mètres de diamètre sont constituées par deux tôles roulées et assemblées par des bossages « O » soudées par le procédé Alexander. Ce procédé permet d'exécuter rapidement de grosses soudures qui présentent une haute résistance mécanique.

Dans le cas de moteurs ventilés, la circulation d'air se produit à l'intérieur d'un carter construit en tôles soudées et fixé par soudure sur la carcasse.

Fig. 10 A.

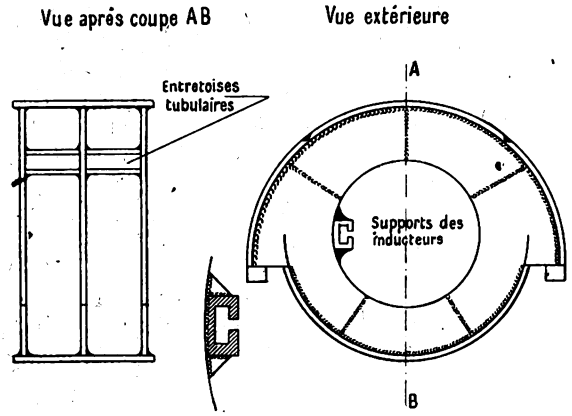


Schéma de soudure d'une carcasse d'alternateur. — Les carcasses des grands alternateurs pouvant atteindre 8 mètres de diamètre sont constituées par des tôles roulées soudées entre elles pour former la virole, et fixées par soudure sur 3 ou 4 nervures perpendiculaires elles-mêmes constituées par des éléments de tôles soudées. Ces nervures sont entretoisées entre elles par des tubes soudés.

Les supports des inducteurs sont également fixés par soudure sur la carcasse ainsi constituée.

Fig. 10 B.

tion et de la dilatation, les qualités des différents types de soudure, les montages et les méthodes à employer.

Digitized by Google

C'est un grand honneur pour la General Electric Company, d'avoir surmonté ces difficultés et cela prouve, comme le dit M. W. L. Warner, que « Là où il y a une volonté, il y a un moyen ».

Nous avons eu l'occasion de visiter l'immense usine de Schenectady, et nous avons eu la surprise de constater que la soudure n'était pas

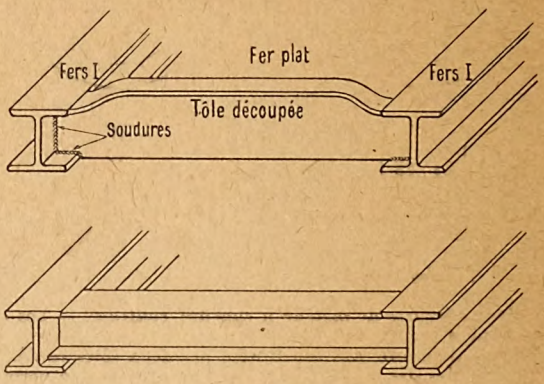


Schéma de soudure de bâtis de groupes convertisseurs. — Ces bâtis constitués par des profilés soudés remplacent de plus en plus les bâtis de fonte et la G. E. C° pousse actuellement l'étude d'un bâti en profilés soudés par un turbo-alternateur de 12 000 KVA.

Fig. 10 C.

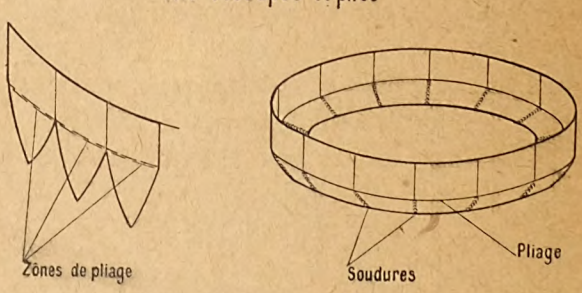


Schéma de soudure d'un carter de machine électrique. — Ces carters peuvent atteindre 6 à 8 mètres de diamètre. Ils sont entièrement soudés comme d'ailleurs les coffrets d'appareillage en tôles minces soudées à l'hydrogène atomique par les procédés Langmuir.

Fig. 10 D.

représentée dans un atelier par des postes relégués dans des coins obscurs, mais qu'un immense atelier spécial centralisait toutes les fabrications soudées des autres ateliers. L'activité de cet atelier où travaillaient une cinquantaine de soudeurs, n'est-elle pas la preuve vivante que la soudure, procédé de construction, présente des avantages économiques qui valent la peine d'être étudiés ?

On construit à la G.E.C° des carcasses de moteurs à courant continu,

Digitized by Google

en tôles roulées et soudées et des carcasses d'alternateurs en tôles roulées, nervurées et entretoisées. Certaines de ces carcasses ont 8 m de diamètre et correspondent à des machines d'une puissance de 20 000 kVA (fig. 9).

La construction de bâtis de groupes convertisseurs ou même de turbo-alternateurs en profilés soudés est courante dans ces ateliers (fig. 10 A, B, C, D).

De même que la G.E.C° construit en assemblages soudés les grosses machines électriques, la Lincoln construit par soudure les petits moteurs.

Deux cornières roulées, des fers plats comme entretoises, constituent la carcasse, les barres de cuivre des cages d'écureuil sont également fixées par soudure.

Quels sont les avantages de ces conceptions nouvelles ?

Economie de temps d'abord. On peut avoir, en huit jours, le bâti pour lequel la fonderie demande deux mois de délai.

Sécurité ensuite. Pas de pièces de fonte susceptibles d'être retraitées pour soufflures ou cassures.

Economie d'argent. Bien que l'on économise le modèle, que l'on puisse diminuer les poids en faisant travailler des métaux laminés au lieu de métaux fondus, cette économie est la moins importante en raison du prix de revient des soudures.

On l'estime à 10 pour cent dans les ateliers bien organisés.

En Amérique, pays de la grande série, l'assemblage soudé se généralise, ne peut-il en être de même en France, pays des petites séries ?

L'industrie automobile a déjà répondu à cette question, et on peut penser que l'exemple de l'industrie automobile sera suivi par les autres industries.

Soudure ou rivetage ?

Prétendre que la soudure remplacera partout le rivetage serait faire preuve d'un esprit aussi étroit que de prétendre qu'elle éliminera la fonderie de l'industrie.

Ce serait en outre méconnaître les intérêts propres de la soudure.

Mais on peut prétendre qu'il y a des applications où elle semble s'imposer. Une des plus importantes est la construction métallique et les Américains font de grands efforts pour en généraliser l'emploi, dans cette branche de l'industrie.

Digitized by Google

La Westinghouse a exécuté méthodiquement une série d'essais d'assemblages métalliques soudés. Ces assemblages correspondent à ceux que l'on serait amené à rencontrer dans une construction soudée. Les résultats à ce point de vue sont donc de première importance. La résistance des assemblages soudés aux efforts statiques, aux chocs, et aux vibrations s'est montrée telle que les ingénieurs n'ont pas hésité à construire un atelier par ce procédé.

Nous avons eu l'occasion de voir cet atelier à East Pittsburg, et la simplification du dessin nous a vivement frappés, mais nous n'avons relevé aucune conception nouvelle adaptée à un procédé nouveau.

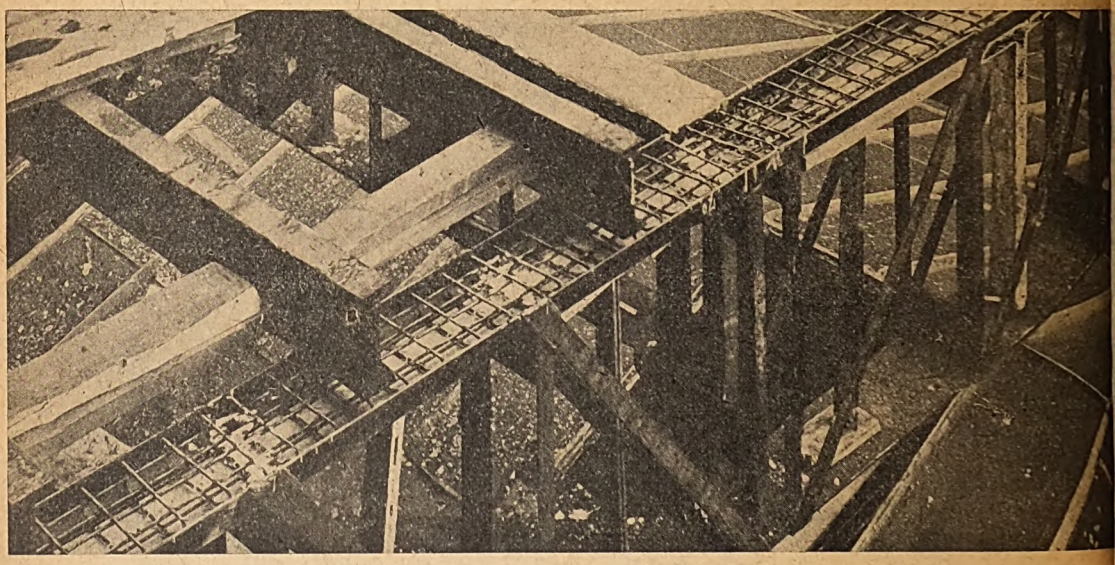


Fig. 11. — Poutre soudée.
On remarque l'armature du béton de la partie supérieure de la poutre.
La partie inférieure est constituée par un fer plat.

En France, au contraire, on s'est efforcé d'effacer de son esprit les dessins des charpentes rivées pour les remplacer par un dessin conçu par un soudeur.

Pour s'assurer de la valeur de ses conceptions hardies, la Soudure Autogène Française a établi dans ses ateliers une passerelle type Pratt d'une portée de 9,90 m entre appuis et d'une hauteur de 0,90 m. La membrure inférieure se compose d'un plat de 220×10 mm et la membrure supérieure est en béton armé coulé entre deux cornières de $50 \times 50 \times 5$ mm (fig. 11).

Cette disposition est rationnelle, puisqu'elle utilise le béton en compression et qu'une dalle de béton devait être posée sur la poutre.

Digitized by Google

La poutre était fixée par soudure sur deux goussets eux-mêmes soudés sur les armatures de l'immeuble.

Elle a été essayée statiquement sous une charge de 4 500 kg, et les enregistreurs ont démontré qu'elle se comportait comme une pièce parfaitement élastique.

On peut tirer de cette réalisation et de ces essais les conclusions suivantes :

1° *Au point de vue pratique.*

Suppression du poinçonnage, alésage, rivetage, par suite simplification du traçage.

Simplification des assemblages; économie de métal.

Rapidité d'usinage et de montage.

Réduction de la main-d'œuvre.

Suppression du bruit du rivetage, permettant le travail de nuit dans les villes. Cet avantage est tellement important aux Etats-Unis, que les Américains emploient l'expression *noiseless* pour désigner ce procédé de construction.

2° *Au point de vue technique.*

Suppression des moments secondaires.

Encastrement important de la poutre aux appuis.

Suppression des réductions de section au perçage des trous.

Ces résulatts nous permettent de partager l'optimisme des Ingénieurs soudeurs américains, qui voient dans un avenir très rapproché toutes les charpentes métalliques assemblées sur chantier par soudure.

Soudure électrique ou soudure au chalumeau ?

De la rivalité qui existe entre les deux procédés, beaucoup plus âpre aux Etats-Unis qu'en France, naît le progrès. Il y a le plus grand intérêt à ce que cette concurrence joue pour le développement de la soudure en général. Chaque procédé répond à des applications déterminées et loin de se concurrencer, la soudure oxyacétylénique et la soudure électrique se complètent.

C'est ainsi qu'à Chicago, ayant eu l'occasion d'assister à un Congrès de l'International Acétylène Association, un vendeur de gaz déclarait que l'effort fait par la soudure électrique, loin de l'inquiéter le réjouissait, car lorsque l'un des procédés serait adopté, l'autre suivrait et que l'équilibre s'établirait à « fifty-fifty », c'est-à-dire 50 pour cent de travaux pour la soudure électrique et 50 pour cent pour la soudure au chalumeau.

Digitized by Google

D'ailleurs, pour répondre probablement à la publicité faite à ce sujet par la Westinghouse, la Société Oxweld, vendeur de gaz, exposait à Buffalo une ferme soudée au chalumeau.

La machine automatique à souder au chalumeau, connue depuis longtemps en France, est concurrencée aux Etats-Unis par les machines automatiques à souder à l'arc électrique.

L'électrode, constituée par un fil dont l'enrobage est protégé par un

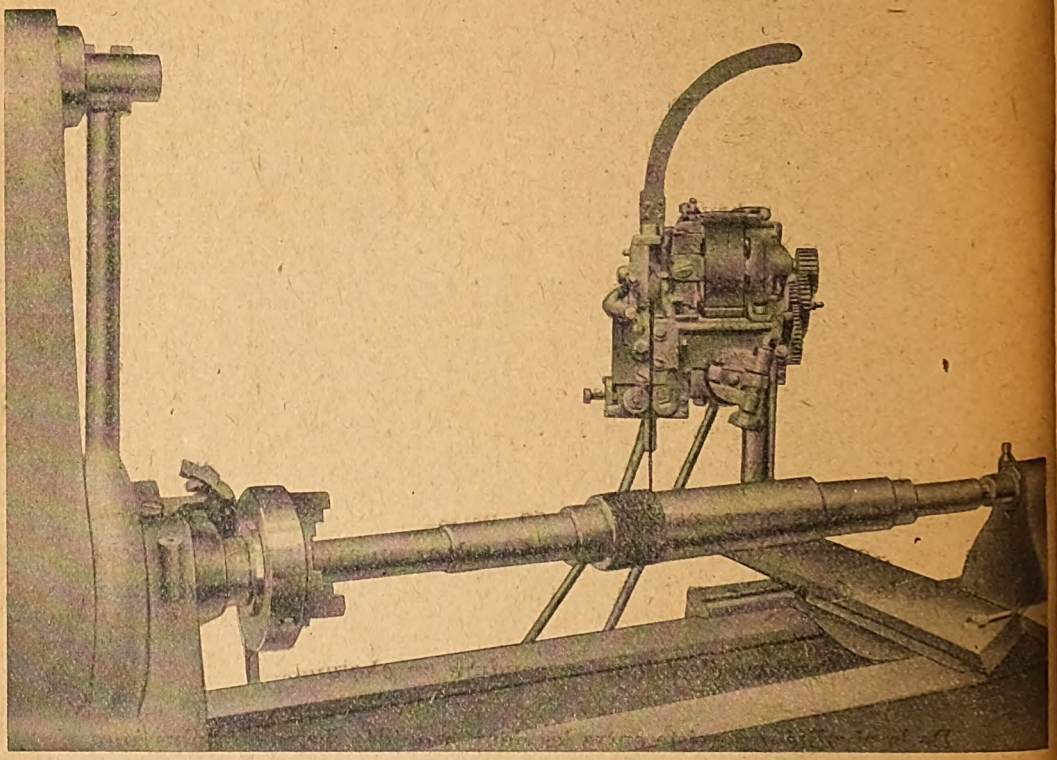


Fig. 12. — Vue d'une machine de soudure automatique G. E. C. rechargeant un arbre de moteur électrique usé.

feuillard extérieur, est amenée sur la pièce par des galets d'entraînement commandés par un moteur électrique et un embrayage magnétique qui règlent automatiquement la longueur de l'arc (fig. 12).

La machine à souder à l'arc devient un outil aussi soigné qu'un tour de précision, dont les dimensions peuvent atteindre plusieurs mètres et dont les commandes sont toutes électriques (fig. 13).

Alors que toutes les machines-outils connues ne permettent que d'enlever du métal, les machines automatiques de soudure permettent

Digitized by Google

de rapporter du métal et l'on comprend tout le parti que l'industrie future pourra en tirer.

Soudeurs au gaz et soudeurs électriques, voient également naître aux Etats-Unis de nouvelles méthodes de soudure, qui mettraient fin à leur vieille rivalité par l'emploi de chalumeaux électriques actuellement à l'étude dans les Laboratoires de la General Electric Company.

Les procédés étudiés par Dr Irving Langmuir et par M. P. Alexander, emploient l'arc électrique et de l'hydrogène.

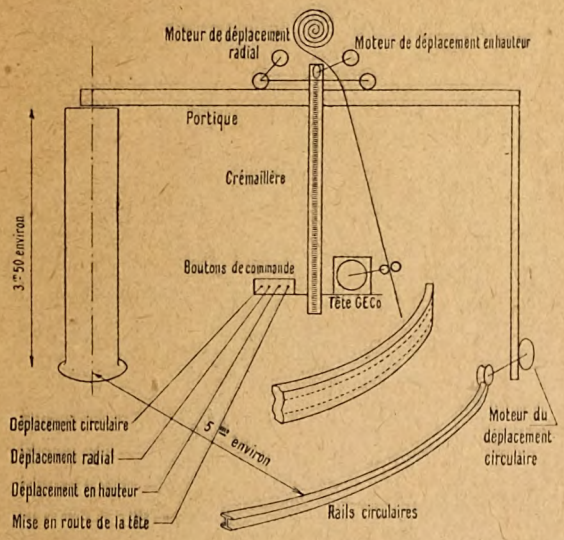


Schéma d'une machine automatique de soudure à l'arc. — Dans la construction des carcasses d'alternateurs, les soudures circulaires de la virole extérieure sur les nervures perpendiculaires s'exécutent avec une tête G. E. Co de soudure automatique à l'arc.

Cette tête est montée sur un bâti de grandes dimensions lui permettant de suivre le contour de la virole placée concentriquement au pylone central. Tous les mouvements de la tête permettant de la déplacer, radialement, circulairement, ou en hauteur, sont commandés par des moteurs électriques.

L'ouvrier se contente de surveiller et de contrôler ces mouvements en agissant sur les boutons poussoirs d'un tableau de commande.

Fig. 13.

Dans le procédé du Dr Langmuir, on cherche à créer de l'hydrogène atomique en obligeant un courant d'hydrogène à traverser un arc jaillissant entre deux électrodes de tungstène, dans un véritable chalumeau électrique.

Cet hydrogène transporte l'énergie de l'arc dans le cycle suivant :

Dissociation de H^2 en 2H;

Transport des 2H sur la pièce;

Recombinaison des 2H sur la pièce en H^2.

La haute température provenant de cette dernière réaction est très localisée sur une faible étendue de la pièce.

Digitized by Google

Les calories apportées proviennent de l'énergie de l'arc transportée par le cycle de dissociation.

L'excès d'hydrogène brûle à l'air avec une action négligeable au point de vue thermique, et une action importante pour isoler la pièce de l'air.

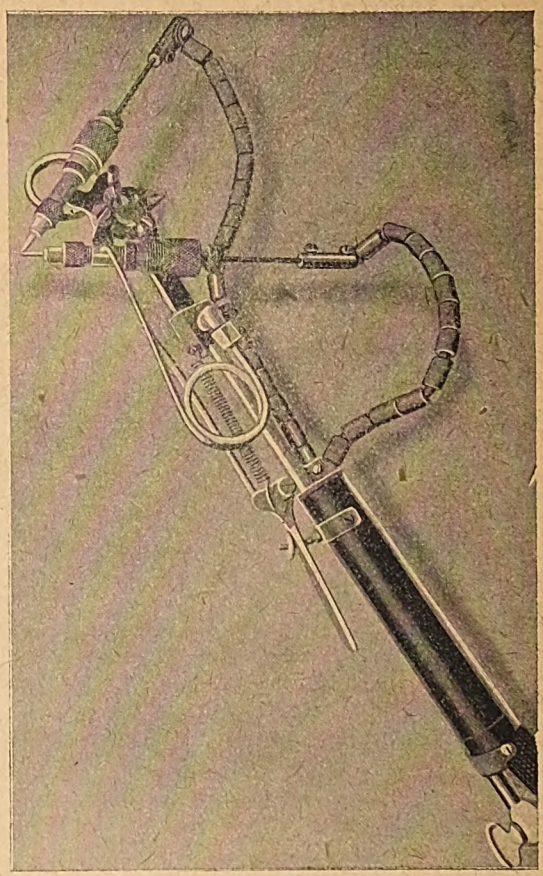


Fig. 14. — Chalumeau pour soudure électrique à hydrogène atomique (procédés I. Langmuir).

On comprend, dès lors, que l'hydrogène étant en très grand excès pour le transport de calories, il est inutile de modifier son débit et les variations de régime nécessitées par les différentes épaisseurs à souder s'obtiennent uniquement en modifiant la puissance de l'arc.

Le chalumeau à hydrogène atomique (fig. 14) apparaît donc comme un artifice, permettant d'utiliser l'énergie d'un arc à une plus haute température que celle de l'arc lui-même, et avec un rendement fata-

Digitized by Google

lement inférieur à celui total de l'arc mais qui, pour l'utilisation particulière de la soudure, peut être supérieur au rendement industriel de l'arc jaillissant directement sur la pièce. Ce rendement a été en effet reconnu très mauvais à la suite d'études théoriques faites par nous avant la fabrication des électrodes dites à « métal d'apport ».

L'augmentation de ce rendement avec le chalumeau Langmuir, pourrait être due à cette augmentation de la température amenant une plus grande concentration de l'énergie sur le point touché par la flamme, mais ce n'est qu'une hypothèse.

En résumé, avec le chalumeau Langmuir, transport avec transfor-

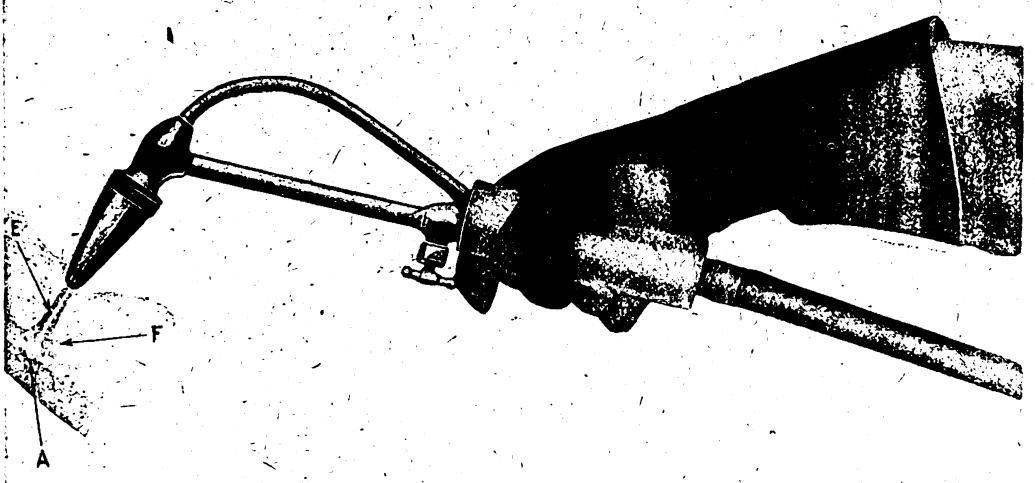


Fig. 15. — Chalumeau pour soudure à l'arc semi-automatique en atmosphère d'hydrogène (procédé M. P. Alexander).
A arc. E fil électrode. F flamme d'hydrogène.

mation complète de l'énergie de l'arc sans flamme de température théorique de 8 925°C, alors que les mêmes calculs théoriques conduisent à 3 425°C pour la flamme oxhydrique, et à 6 727°C, pour la flamme oxyacétylénique.

Quant aux autres caractéristiques de cette flamme, la plus importante à notre avis, est son pouvoir réducteur et son absence de vitesse qui permet une fusion absolument calme du métal.

Au contraire, dans la méthode Alexander, un arc ordinaire de soudure est entouré d'une atmosphère d'hydrogène (fig. 15).

L'arc conserve ses propriétés thermiques d'arc de soudure, avec l'inconvénient d'une assez grande instabilité due à l'hydrogène.

L'hydrogène atomique ainsi formé n'est pas discipliné par l'opérateur comme dans le procédé précédent; tout au plus pourra-t-il jouer

Digitized by Google

le rôle de réducteur passant sur les parties de métal fondu qu'il rencontrera par hasard, mais il ne viendra rien ajouter aux propriétés essentielles de l'arc, car il n'a pas la forme d'une flamme stable dirigée sur un point déterminé par l'opérateur.

Dans ce procédé, l'hydrogène ne jouera donc qu'un rôle de protection contre l'air et l'hydrogène atomique, en admettant qu'il s'en forme, qu'un rôle réducteur énergique.

Telles sont, à notre avis, les différences fondamentales entre ces deux procédés qui ouvrent des horizons nouveaux pour la soudure autogène en fusionnant intimement la soudure à l'arc et la soudure au gaz.

Digitized by Google

SYSTÈME DE TRACTION A. D. R. A COURANT CONTINU, A DÉMARRAGE SANS RÉSISTANCES ET A RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE.

par M. Della Riccia.

1. — *Principes du système A.D.R.*

Le système A.D.R. de réglage des moteurs à courant continu destinés à la traction, au levage, à l'extraction, au laminage, excluant tout emploi de résistances au démarrage et réalisant une récupération d'énergie au freinage, est basé sur les principes suivants :

a) La subdivision des moteurs à contrôler en deux groupes M et N équivalents, ou bien, ce qui revient au même, l'emploi de moteurs à deux collecteurs et à deux enroulements induits égaux mais distincts.

b) L'application, pour le démarrage, d'une tension progressivement croissante à chacun des deux groupes de moteurs ou de collecteurs, tension qui doit dépasser, à chaque instant, la force contre-électromotrice des moteurs à leur vitesse actuelle, de la quantité nécessaire à entretenir le courant de démarrage pré-établi.

c) L'application, pour le freinage, d'une tension progressivement décroissante à chacun des deux groupes de moteurs ou de collecteurs, tension qui doit être, à chaque instant, inférieure à la force électromotrice engendrée dans les enroulements induits à leur vitesse actuelle, de la quantité nécessaire à entretenir le courant de freinage préétabli; en même temps que l'application d'une tension indépendante aux enroulements inducteurs, si cette application est nécessaire, pour engendrer la dite force électromotrice dans les meilleures conditions de stabilité, comme dans le cas d'emploi de moteurs normalement excités en série.

d) L'obtention de deux tensions simultanément croissantes ou décroissantes au moyen d'un auto-transformateur à courant continu, qui subdivise en trois parties arbitrairement variables e_1, $2e_2$, e_3, la tension V du réseau d'alimentation;

les deux tensions croissantes étant e_1 et e_3 dans une première phase

Digitized by Google

du démarrage, et $e_1 + 2e_2$ et $2e_2 + e_3$ dans une deuxième phase de démarrage;

les deux tensions décroissantes étant $e_1 + 2e_2$ et $2e_2 + e_3$ dans une première phase du freinage, et e_1 et e_3 dans une deuxième phase du freinage.

e) L'obtention de la tension indépendante éventuellement nécessaire pour faire fonctionner les moteurs comme générateurs dans les meilleures conditions de stabilité, au moyen d'une excitatrice auxiliaire entraînée par le dit auto-transformateur fonctionnant partiellement comme moteur.

2. — *Subdiviseur symétrique de tension A.D.R.*

L'auto-transformateur de réglage ou subdiviseur symétrique de tension système A.D.R. peut être constitué de différentes façons.

Essentiellement, il comprend :

A) Quatre, ou seulement trois, enroulements induits connectés en série et intercalés entre le pôle positif et le pôle négatif du réseau; enroulements disposés sur quatre, ou trois, ou deux, ou même une seule armature, et portés par un arbre unique.

B) Quatre, ou trois, ou deux ou même un seul inducteur magnétique, à pôles normaux ou à pôles subdivisés, selon les circonstances.

Mais nous ne prendrons en considération ici que le mode de réalisation qui donne à ce subdiviseur de tension la forme d'un groupe de deux machines, avec deux armatures calées sur un arbre commun, chacune à deux enroulements induits et à deux collecteurs, tournant entre les pôles de deux inducteurs ordinaires.

Soient A, B, C, D, les quatre enroulements induits en série, en partant du pôle positif et en allant vers le pôle négatif du réseau; soient k, l, m, n, o, les cinq bornes de ces quatre enroulements en procédant dans le même ordre; soient e_1, e'_2, e''_2, e_3, les tensions aux bornes des quatre enroulements, toujours dans le même ordre.

Les enroulements induits extrêmes A et D sont portés par une première armature (AD) et soumis à l'action d'un premier inducteur P; les enroulements induits intermédiaires B et C sont portés par une seconde armature (BC) et soumis à l'action d'un second inducteur Q.

Si les enroulements A et D sont égaux entre eux, et si les enroulements B et C sont également égaux entre eux, tout le système est symétrique, soit par rapport aux deux pôles du réseau, soit par rapport à la borne m de milieu du système.

Digitized by Google

On aura alors $e_1 = e_3 = e_1$, $e'_2 = e''_2 = e_2$

et $e_1 + e_2 = 1/2$ V.

Quant à la vitesse de rotation du groupe ainsi constitué, elle dépendra de la somme des deux flux magnétiques Φ_1 et Φ_2 dont le premier traverse le système P (AD), et dont le second traverse le système Q(BC). Si cette somme est maintenue constante, la vitesse du groupe alimenté à tension sensiblement constante, sera sensiblement constante; circonstance favorable à la commande de l'excitatrice indépendante E.

La détermination des excitations nécessaires pour engendrer dans les systèmes P(AD) et Q(BC) deux flux Φ_1 Φ_2 sensiblement complémentaires peut être faite comme il est sommairement indiqué par la

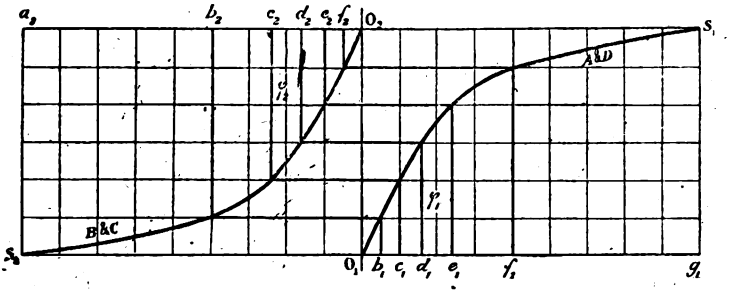


Fig. 1. — Courbes de saturation magnétique.

fig. 1 où O_1S_1 et O_2S_2 sont les courbes de saturation magnétique des deux systèmes P(AD) et Q(BC), tracées en deux sens symétriques et où O_1O_2 donne la mesure du flux total $\Phi_1 + \Phi_2$, assurant, sous la tension normale V du réseau, la vitesse de rotation normale N du groupe de réglage.

Remarquons en passant que lorsque $\Phi_1 = \Phi_2$, non seulement les courants d'excitation des deux parties P(AD) et Q(BC) du groupe de réglage sont égaux, mais en outre la somme de leurs valeurs, ainsi que la somme des carrés de leurs valeurs, sont minimum. Il peut donc convenir de maintenir $\Phi_1 = \Phi_2$ lorsque le groupe doit rester inactif, car cette disposition assurera, outre un même échauffement des deux parties du groupe, un minimum de pertes à vide.

Remarquons encore que, comme le flux total $\Phi_1 + \Phi_2$ traversant les deux parties P(AD) et Q(BC) du groupe de réglage n'est jamais que la moitié du flux maximum que ces deux parties sont capables de porter dans leur ensemble, le système PQ(ABCD) constitue une machine en dérivation très éloignée de la saturation magnétique, et sus-

Digitized by Google

ceptible, par conséquent, de s'accommoder à de fortes variations de la tension appliquée à ses bornes extrêmes *k* et *o*, sans qu'il en résulte de très fortes variations du courant dans ses enroulements induits (ABCD).

3. — *Connexions pricipales et grandeurs en jeu.*

Pour simplifier l'exposition, supposons que les groupes M et N de moteurs soient composés chacun par un même nombre de moteurs en parallèle entre eux.

Supposons en outre que tous les moteurs soient des moteurs excités en série.

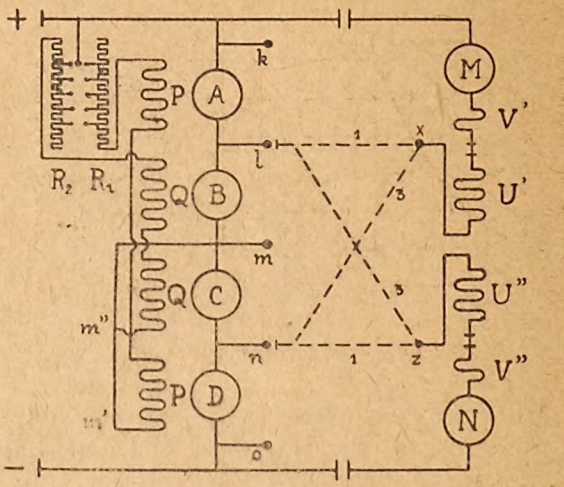


Fig. 2a.

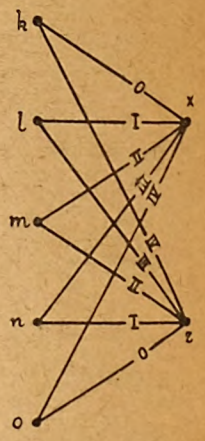


Fig. 2b.

Schéma des connexions principales. Démarrage.

Les pôles positifs des armatures des moteurs du groupe M sont constamment connectés au pôle positif du réseau, de même que la borne *k* du groupe de réglage; et les pôles négatifs des armatures des moteurs du groupe N sont constamment connectés au pôle négatif du réseau, de même que la borne *o* du groupe de réglage.

Pendant le démarrage, les enroulements induits et inducteurs des moteurs restent connectés entre eux; les pôles négatifs des champs des moteurs du groupe M sont successivement connectés aux bornes *l*, *m*, *n*, *o*, du groupe de réglage, et les pôles positifs des champs des moteurs du groupe N sont successivement connectés aux bornes *n*, *m*, *l*, *k*, du groupe de réglage; les changements de connexion des deux groupes de moteurs sont simultanés, de manière à assurer continuel-

Digitized by Google

lement la symétrie de l'ensemble de tous les moteurs et du groupe de réglage (fig. 2*a*, 2*b*).

Pendant le freinage, les enroulements inducteurs des moteurs sont disjoints des enroulements induits correspondants; les pôles négatifs des armatures des moteurs du groupe M sont successivement connectés aux bornes *o*, *n*, *m*, *l*, *k*, du groupe de réglage, et les pôles positifs des armatures des moteurs du groupe N sont successivement connectés aux bornes *k*, *l*, *m*, *n*, *o*, du groupe de réglage; les changements de connexion des deux groupes de moteurs étant encore simultanés afin d'entretenir la symétrie de l'ensemble. Entretemps, les champs des deux groupes de moteurs, convenablement connectés entre eux, sont alimentés par l'excitatrice indépendante E (fig. 3*a*, 3*b*).

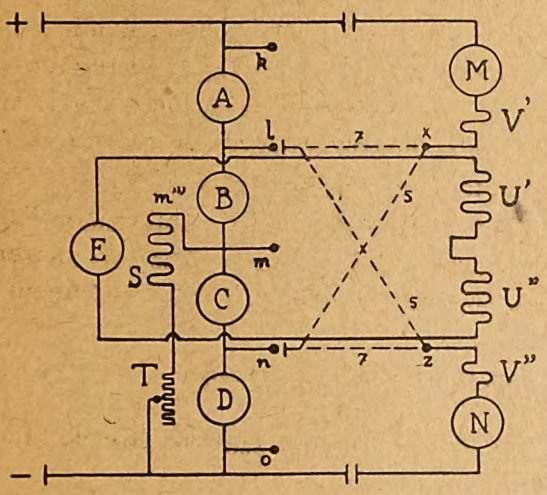


Fig. 3*a*.

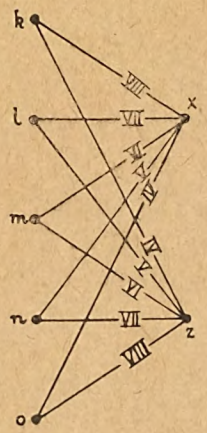


Fig. 3*b*.

Schéma des connexions principales. Freinage.

Nous dirons « droites » : les connexions des moteurs M à la borne *l* et des moteurs N à la borne *n* du groupe de réglage; et « croisées » : les connexions des moteurs M à la borne *n* et des moteurs N à la borne *l* du groupe de réglage.

Mais le réglage progressif des moteurs n'est pas obtenu par le seul changement des connexions; il comporte encore des changements dans les excitations des deux parties P(AD) et Q(BC) du groupe de réglage, ainsi que nous allons l'exposer.

Prenons toujours comme positive la direction allant du pôle négatif *o* au pôle positif *k* du groupe de réglage ou du réseau, et représentons par :

(*a*) e_1, i_1, w_1; (*b*) e_2, i_2, w_2; (*c*) v, i, w; (*d*) V, I, W;

Digitized by Google

respectivement la f.é.m. ou la tension, le courant et la puissance électrique relatifs : (*a*) aux enroulements A et D; (*b*) aux enroulements B et C; (*c*) aux moteurs M et N; (*d*) au réseau.

Si l'on suppose nulles toutes les pertes intérieures du groupe, on aura constamment :

$$w_1 + w_2 = e_1 i_1 + e_2 i_2 = 0$$

et

$$2w = 2vi = \mathrm{W} = \mathrm{VI}$$

avec

$$\mathrm{I} = i + i_1.$$

On aura encore, dans le cas des connexions droites :

$$v = e_1 \qquad \text{et} \quad i = i_2 - i_1;$$

et dans le cas des connexions croisées :

$$v = e_1 + 2e_2 \quad \text{et} \quad i = i_1 - i_2.$$

Dans l'exposé suivant nous allons supposer que les tensions v successivement appliquées aux moteurs M et N constituent une progression de raison 1/12 V, entre la tension nulle O et la pleine tension V du réseau, au démarrage, et une régression de même raison, entre la pleine tension V du réseau et la tension nulle O, au freinage complet.

Dans ce cas 1/12 V est la tension minimum et 5/12 V est la tension maximum à obtenir aux bornes de chacun des quatre enroulements induits A, B, C, D : et cette limitation place les collecteurs desservant ces enroulements dans de bonnes conditions de fonctionnement.

4. — *Fonctionnement du système.*

Aussi bien le démarrage que le freinage peuvent être décomposés en deux phases distinctes.

Démarrage. — Première phase (fig. 2*a*, 2*b*).

Position O. — Connexions *xk* et *zo*. — Les moteurs M et N, court-circuités, ne reçoivent aucune tension; tout le système est inactif.

Position I. — Connexions droites *xl* et *zn*. — Les enroulements extérieurs A et D produisent deux tensions progressivement croissantes de 1/12 V à 5/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement décroissants de 5/6 *i* à 1/6 *i* positifs; ils fonctionnent donc comme générateurs et débitent les puissances successives 5/72 V*i*, 8/72 V*i*, 9/72 V*i*, 8/72 V*i*, 5/72 V*i*. Les enroulements intérieurs B et C produisent deux tensions progressivement décroissantes de 5/12 V à 1/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement croissants de 1/6 *i* à 5/6 *i* négatifs; ils fonctionnent donc comme moteurs absorbant les

Digitized by Google

puissances successives indiquées plus haut. Les moteurs M et N reçoivent les tensions progressivement croissantes de 1/12 V à 5/12 V. Le réseau débite un courant progressivement croissant de 1/6 i à 5/6 i (fig. 4, I).

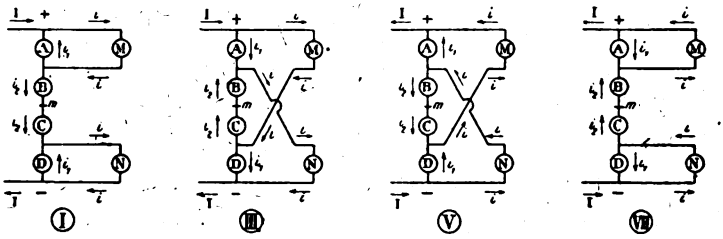


Fig. 4. — Connexions successives au démarrage et au freinage.

Position II. — Connexions xm et zm. — Les moteurs M et N en série reçoivent chacun une tension 1/2 V. Le groupe est inactif. Le réseau débite le courant i.

Démarrage. — Seconde phase (fig. 2*a*, 2*b*).

Position III. — Connexions croisées xn et zl. — Les enroulements extrêmes A et D produisent deux tensions progressivement décroissantes de 5/12 V à 1/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement croissants de 1/6 i à 5/6 i négatifs; ils fonctionnent donc comme moteurs et absorbent les mêmes puissances successives que celles indiquées plus haut. Les enroulements intermédiaires B et C produisent deux tensions progressivement croissantes de 1/12 V à 5/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement décroissants de 5/6 i à 1/6 i positifs; ils fonctionnennt donc comme générateurs débitant les mêmes puissances que celles indiquées plus haut. Les moteurs M et N reçoivent deux tensions progressivement croissantes de 7/12 V à 11/12 V. Le réseau débite un courant progressivement croissant de 7/6 i à 11/6 i (fig. 4, III).

Position IV. — Connexions xo et zk. — Les moteurs M et N en parallèle reçoivent chacun la pleine tension V du réseau. Le groupe est inactif. Le réseau débite le courant $2i$.

Freinage. — Première phase (fig. 3*a*, 3*b*).

Position IV *bis*. — Connexions xo et zk. — Les moteurs M et N en parallèle, excités par l'excitatrice indépendante, fonctionnent comme

Digitized by Google

générateurs, chacun sous la pleine tension V du réseau. Le groupe est inactif. Le réseau absorbe le courant $2i$.

Position V. — Connexions croisées *xn* et *zl*. — Les enroulements extrêmes A et D produisent deux tensions progressivement croissantes de 1/12 V à 5/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement décroissants de 5/6 i à 1/6 i positifs; ils fonctionnent donc comme générateurs et débitent encore les mêmes puissances successives que celles indiquées plus haut. Les enroulements intermédiaires B et C produisent deux tensions progressivement décroissantes de 5/12 V à 1/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement croissants de 1/6 i à 5/6 i négatifs; ils fonctionnent donc comme moteurs et absorbent encore les mêmes puissances successives que celles indiquées plus haut. Les moteurs M et N reçoivent deux tensions progressivement décroissantes de 11/12 V à 7/12 V. Le réseau absorbe un courant progressivement décroissant de 11/6 i à 7/6 i (fig. 4, V).

Position VI. — Connexions *xm* et *zm*. — Les moteurs M et N en série rencontrent chacun une tension 1/2 V. Le groupe est inactif. Le réseau absorbe un courant i.

Freinage. — Seconde phase (fig. 3*a*, 3*b*).

Position VII. — Connexions droites *xl* et *zn*. — Les enroulements extérieurs A et D produisent deux tensions progressivement décroissantes de 5/12 V à 1/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement croissants de 1/6 i à 5/6 i négatifs; ils fonctionnent donc comme moteurs et absorbent toujours les mêmes puissances successives indiquées plus haut. Les enroulements intérieurs B et C produisent deux tensions progressivement croissantes de 1/12 V à 5/12 V; ils sont parcourus par deux courants progressivement décroissants de 5/6 i à 1/6 i positifs; ils fonctionnent donc comme générateurs et débitent toujours les mêmes puissances successives indiquées plus haut. Les moteurs M et N reçoivent deux tensions progressivement décroissantes de 5/12 V à 1/12 V. Le réseau absorbe un courant progressivement décroissant de 5/6 i à 1/6 i (fig. 4, VII).

Position VIII. — Connexions *xk* et *zo*. — Les moteurs M et N court-circuités ne rencontrent plus aucune tension; ils peuvent encore freiner, mais sans plus fournir d'énergie au réseau.

Digitized by Google

On remarquera que lorsque les conducteurs venant de x et de z passent d'une borne quelconque k, l, m, n, o du groupe à la suivante (tant dans cet ordre que dans l'ordre opposé), le passage se fait, dans tous les cas, lorsque la tension engendrée dans l'enroulement A, ou B, ou C, ou D, intercalé entre la borne abandonnée et la borne abordée, est réduite à sa valeur minimum. Si l'on a soin de ne pas interrompre le contact avec la première borne avant d'établir le contact avec la seconde, le passage est effectué en court-circuitant momentanément l'enroulement et sans rupture franche de courant. Ce passage est donc une sorte de commutation, comme celle qui se produit sous un balais de collecteur de machine à courant continu. Cette commutation peut être réalisée de deux manières différentes.

Première manière : dans les positions O, IV, IV *bis*, VIII, on maintient $e_1 = 1/12$ V et $e_2 = 5/12$ V, et dans les positions II, VI, on maintient $e_1 = 5/12$ V et $e_2 = 1/12$ V;

Seconde manière : dans les positions O, IV, IV *bis*, VIII, on essaie de produire $e_1 = 0$ et $e_2 = 1/2$ V, et dans les positions II, VI, on essaie de produire $e_1 = 1/2$ V et $e_2 = 0$.

Si l'on procède de la première manière, la commutation a lieu en court-circuitant les enroulements sous une tension égale à 1/12 V; si l'on procède de la seconde manière, la commutation a lieu en court-circuitant les enroulements sous une tension correspondant au magnétisme rémanent, tension généralement inférieure à 1/12 V.

Mais la commutation peut avoir lieu d'une manière excessivement rapide, et la pratique a démontré qu'il est superflu de chercher à atténuer les effets des courts-circuitages des enroulements induits, par des résistances extérieures d'étouffement des courants de court-circuit.

5. — *Dimensions du subdiviseur de tension.*

Comme on le voit, le groupe de réglage n'intervient que deux fois au cours du démarrage et deux fois au cours du freinage. Le reste du temps, pendant la marche des moteurs, soit sous la moitié de la tension du réseau, soit sous la pleine tension du réseau, tant au démarrage qu'au freinage, comme pendant la marche à la dérive sans courant, le groupe est inactif, c'est-à-dire qu'il se borne à tourner à vide.

Pendant les périodes d'activité du groupe, chacun des quatre enroulements A, B, C, D, se borne à produire une tension comprise entre 1/12 V et 5/12 V, à porter un courant compris entre 1/6 i et

Digitized by Google

5/6 i, à absorber ou à débiter une puissance électrique comprise entre 5/72 Vi et 9/72 Vi (fig. 5).

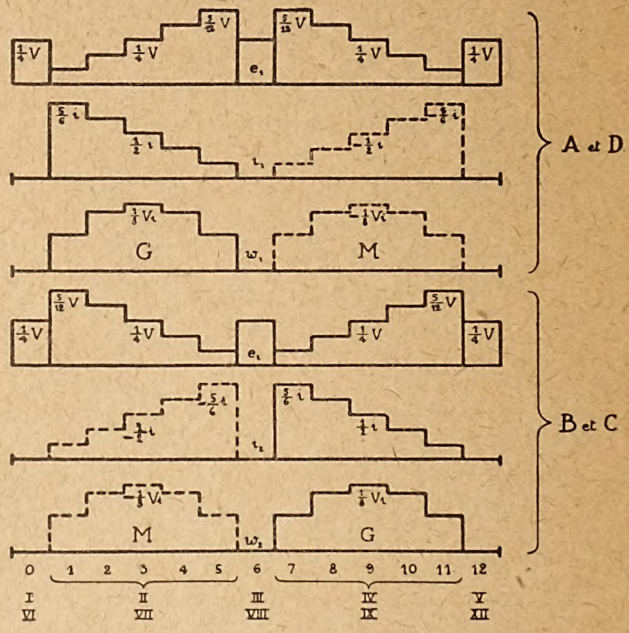


Fig. 5. — Valeurs successives de la tension et du courant dans les induits du subdiviseur de tension.

Si l'on suppose que les cinq parties dont se compose chaque période d'activité aient toutes la même durée, on trouve que la puissance moyenne relative à la période se borne à 7/72 Vi. On trouve pareillement que le courant moyen quadratique se borne à 3,31/6 i, le courant moyen linéaire étant naturellement 3/6 i (fig. 7).

Quoique chacun des quatre enroulements doive être prévu pour produire au besoin la tension 5/12 V et pour porter au besoin le courant 5/6 i (ce qui correspond à une puissance fictive totale de

$$4 \times 5/12 \text{ V} \times 5/6\ i = 100/72 \text{ V}i,$$

alors que la puissance totale des moteurs est $2 \times \text{V} \times i = 2$ Vi), comme moteur-générateur, le groupe ne doit transformer, au maximum, qu'une puissance égale à $2 \times 3/12 \text{ V} \times 3/6\ i = 18/72$ Vi, et en moyenne, pendant des intervalles de temps très limités,

$$2 \times 7/72 = 14/72 \text{ V}i.$$

Comme les enroulements A et D d'une part, et B et D d'autre part, sont alternativement moteurs et générateurs, leur réaction d'armature doit être compensée. Les deux machines de l'auto-transformateur doi-

Digitized by Google

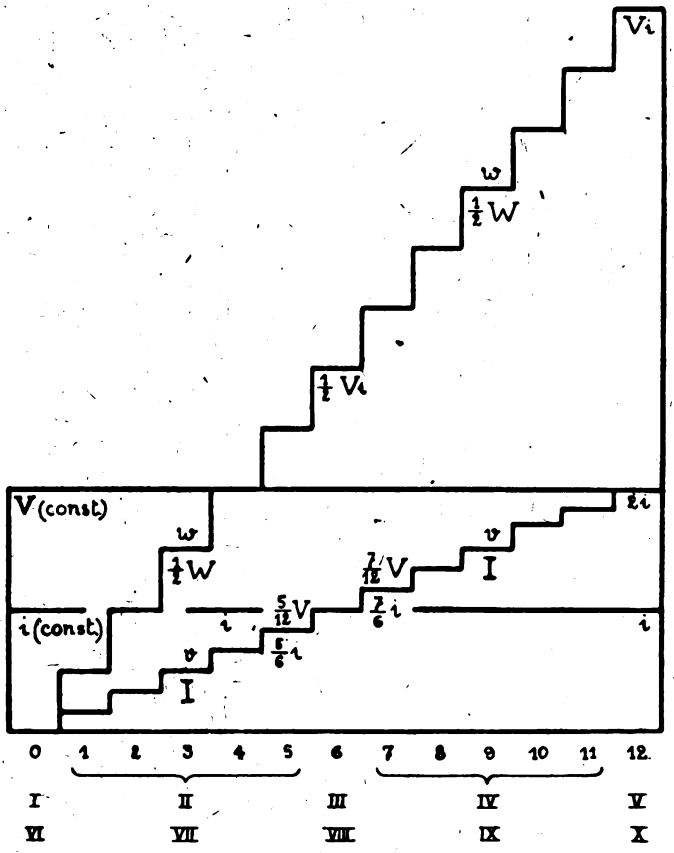


Fig. 6. — Valeurs successives de la tension, du courant et de la puissance.

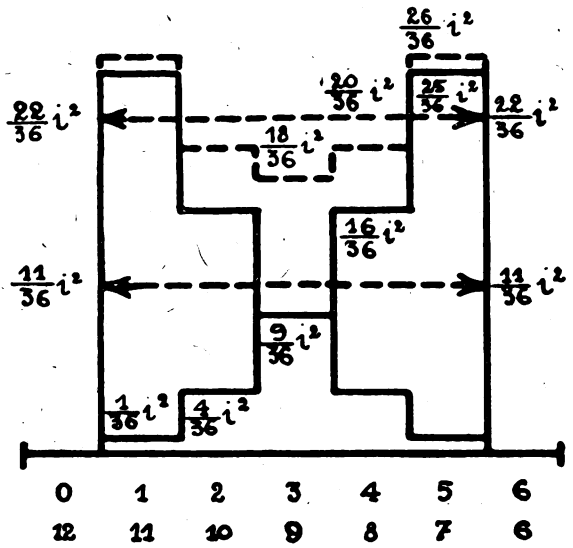


Fig. 7. — Valeurs successives et moyenne du courant quadratique.

Digitized by Google

vent donc, outre des pôles de commutation, être munies d'enroulements compensateurs. Le groupe est par conséquent un peu compliqué, mais les deux circonstances : 1° que la puissance électrique maximum à transformer n'est jamais que 1/4 Vi, soit le huitième de la puissance 2 Vi absorbée ou débitée globalement par l'ensemble des moteurs contrôlés; 2° que le courant moyen quadratique, à quoi se proportionne la production de chaleur dans chacun des quatre enroulements induits, atteint à peine, si on le rapporte aux seules périodes d'activité du groupe qui ne sont d'ailleurs que temporaires, que 55 pour cent du courant normal absorbé ou débité par chacun des deux groupes de moteurs pendant le démarrage ou pendant le freinage; ces deux circonstances jointes à la possibilité d'adopter pour ce groupe de réglage une vitesse normale de marche assez élevée et à la possibilité de ventiler très efficacement cette machine par ses propres moyens, permettent de lui assigner des dimensions très réduites.

Ces mêmes circonstances permettent encore de limiter beaucoup les pertes intérieures de cette machine, qui peut atteindre de très bons rendements moyens.

En fait, un subdiviseur de tension approprié au réglage de deux moteurs de 115 — 150 chevaux unihoraires — la première de ces puissances se rapportant à la capacité que les moteurs pourraient se borner à avoir pour le service ordinaire et la seconde de ces puissances se rapportant à la capacité que les moteurs doivent avoir pour permettre, outre ce service, un freinage électrique complet — présente les caractéristiques suivantes :

Puissance unihoraire de l'auto-transformateur : 2×50 kW;
Puissance de l'excitatrice : environ 20 kW;
Vitesse de rotation : 1 600 tours par minute;
Encombrement : $171 \times 58 \times 58$ cm^3;
Poids : environ 1 200 kg.

Et un subdiviseur de tension approprié au réglage de quatre moteurs de 100 — 140 chevaux unihoraires, présente les caractéristiques suivantes :

Puissance unihoraire de l'auto-transformateur : 2×85 kW;
Puissance de l'excitatrice : environ 30 kW;
Vitesse de rotation : 1 800 tours par minute;
Encombrement : $212 \times 63 \times 62$ cm^3;
Poids : environ 1 600 kg.

Digitized by Google

Comme on peut en juger par ces deux exemples qui ont été particulièrement étudiés, le poids du subdiviseur de tension est de l'ordre de 25 pour cent de celui de l'ensemble des moteurs qu'il est destiné à contrôler.

La forme générale du subdiviseur de tension est indiquée grossièrement par la figure 8.

6. — *Variations de vitesse du subdiviseur de tension.*

Si l'on dit r la résistance ohmique de l'un quelconque des quatre enroulements induits A, B, C, D, et si l'on dit maintenant e_1, e_2, v_1, v_2, les deux f.é.m. et les deux tensions aux bornes des enroulements A et B (ou bien D et C), on peut écrire :

$$1/2\ \mathrm{V} = v_1 + v_2 = e_1 - ri_1 + e_2 - ri_2 = k\mathrm{N}(\Phi_1 + \Phi_2) - r(i_1 + i_2).$$

Par conséquent la vitesse de rotation du groupe peut être exprimée par :

$$\mathrm{N} = \mathrm{H} + \mathrm{K}(i_1 + i_2),$$

où $$\mathrm{H} = \mathrm{V}/2k(\Phi_1 + \Phi_2) \quad \text{et} \quad \mathrm{K} = r/k(\Phi_2 + \Phi_1).$$

Pendant chacune des quatre phases de fonctionnement du groupe considéré au paragraphe 4, en allant à la limite,

i_1 varie de $+ i$ à 0, de 0 à $- i$, de $+ i$ à 0, de 0 à $- i$;

i_2 varie de 0 à $- i$, de $+ i$ à 0, de 0 à $- i$, de $+ i$ à 0.

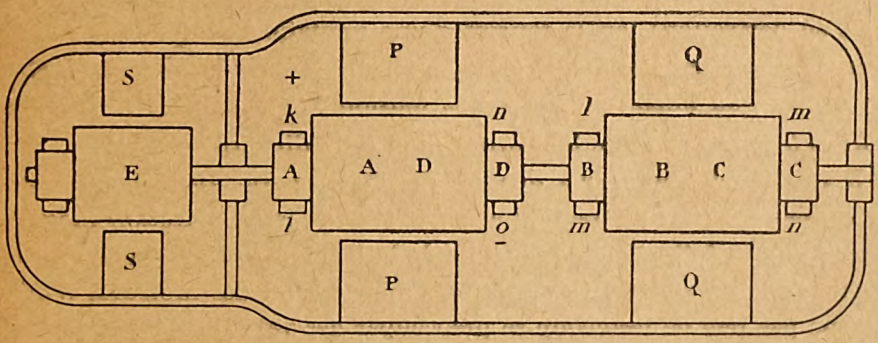


Fig. 8. — Forme générale du subdiviseur de tension.

La somme algébrique $i_1 + i_2$ varie donc, à chacune des dites quatre phases de fonctionnement, de $+ i$ à $- i$. Par conséquent la vitesse N varie, à chacune des dites phases,

de $$\mathrm{H} + \mathrm{K}i \text{ à } \mathrm{H} - \mathrm{K}i.$$

Ces variations de vitesse ne deviennent importantes que si la résistance r est élevée, ce qu'il convient d'éviter également pour ne pas amoindrir le rendement du groupe.

Digitized by Google

En cas de nécessité, on peut réduire ces variations de vitesse par un compoundage des deux parties P (AD) et Q (BC) du groupe, compensant partiellement cette résistance r, c'est-à-dire par un compoundage ayant pour effet de survolter légèrement l'armature fonctionnant comme générateur, et de dévolter légèrement l'armature fonctionnant comme moteur, ce qui est facile à réaliser, puisque le sens du compoundage s'invertit tout naturellement en même temps que le courant d'armature.

Un autre moyen de réduire, si nécessaire, les variations de vitesse du groupe de réglage, consiste dans un léger déplacement des balais en arrière de la position neutre sur les quatre collecteurs.

D'autres variations de vitesse peuvent se produire lors de la mise en court-circuit des enroulements induits A et D ou B et C pour la commutation, parce qu'alors le flux Φ_1 ou Φ_2 cesse momentanément d'avoir une action sur la vitesse N. Mais cela n'arrive que lorsque ce flux est réduit à sa valeur minimum : 1/6 du flux total ou bien la valeur rémanente. D'autre part ces variations parasites sont d'autant plus réduites que le court-circuit est plus rapide.

Les variations de vitesse du groupe ne sont d'ailleurs nuisibles que si elles affectent sensiblement la tension aux bornes de l'excitatrice placée en bout d'arbre du groupe de réglage. Leur effet est fortement réduit si, au lieu de fournir l'excitatrice d'une auto-excitation (excitatrice en dérivation), on la fournit d'une excitation indépendante, alimentée par la tension V du réseau, recueillie entre les bornes k et o du groupe, ou mieux encore par la tension 1/2 V recueillie entre les bornes k et m, ou entre les bornes m et o du dit groupe.

Il y a lieu de remarquer que cette excitatrice doit fournir une excitation des moteurs de traction assez proche de leur saturation magnétique; une variation même sensible de la tension de l'excitatrice n'entraîne donc qu'une faible variation de la tension des moteurs; il n'y a donc pas lieu de beaucoup se préoccuper des variations de vitesse de groupe de réglage, car celles-ci n'ont pas d'autre influence.

7. — *Dispositions complémentaires.*

Jusqu'ici nous avons supposé que l'enroulement inducteur de chaque moteur de traction était parcouru tout entier, pendant le démarrage, par le courant venant du réseau ou du groupe et circulant également dans l'armature (moteur excité en série), et, pendant le freinage, par un courant produit par l'excitatrice (générateur à excita-

Digitized by Google

tion indépendante). Mais il peut convenir de subdiviser cet enroulement de champ en deux parties, l'une V plus petite, destinée à rester toujours connectée avec l'armature, l'autre U plus importante, susceptible d'être séparée de la précédente.

Pendant le démarrage, cette séparation n'étant pas effectuée, les deux parties restent en série avec l'armature, et la machine fonctionne comme moteur de la manière habituelle (fig. 9, D_1).

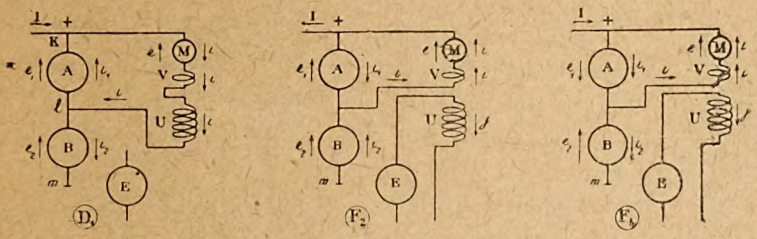


Fig. 9. — Subdivision de l'inducteur du moteur de traction.

Pendant le freinage, cette séparation et effectuée, et le champ U est alimenté par l'excitatrice E (fig. 9, F_2). Quant au champ V, il constitue alors un contre-compound de la machine fonctionnant comme générateur, et est destiné à limiter, dans une certaine mesure, les variations du courant d'armature qui pourraient se produire sous l'effet de variations importantes de la tension opposée aux bornes de cette machine, soit directement par le réseau, soit indirectement par le groupe, car toutes les tensions du groupe varient comme celle du réseau, et dans un réseau de traction il faut s'attendre à des variations de tension assez sensibles.

Ce contre-compound, dûment proportionné, confère à la machine dans laquelle le moteur de traction est transformé pour le freinage, un fonctionnement plus régulier.

Ainsi qu'on l'a vu, si la vitesse du train et par conséquent celle des moteurs est suffisante, le freinage peut commencer sous la tension normale du réseau, sans intervention du groupe de réglage, et se poursuivre ensuite, avec intervention de ce groupe, sous une tension graduellement décroissante, jusqu'au court-circuitage des moteurs, si ce court-circuitage peut avoir encore quelque efficacité.

Mais à la fin du freinage on peut encore, (soit après avoir passé, soit sans avoir passé par le dit court-circuit) établir ou maintenir les

Digitized by Google

connexions droites, augmenter encore l'excitation agissant sur les deux induits intermédiaires, et renverser l'excitation agissant sur les deux induits extrêmes. Cette opération, changeant la direction de e_1 dans A et D, celle de i_2 dans B et C, celle de I sur le réseau (fig. 9, F_4), renverse de nouveau le fonctionnement de l'auto-transformateur et permet un freinage absolu qui peut aller jusqu'au démarrage du train en sens inverse; freinage qui, naturellement, n'est plus régénérateur d'énergie électrique, mais qui constitue un excellent freinage de secours. Ce freinage est capable d'arrêter un train en descente sur une pente.

Dans le cas où il s'agirait de faire de la récupération, non seulement aux arrêts, mais encore à la descente de longues pentes, prolongeant sensiblement la durée d'activité du groupe de réglage, celui-ci doit être proportionné en conséquence.

Comme les pertes relatives minimum à l'intérieur du groupe se présentent, ainsi que nous l'avons déjà vu (fig. 1 et 7), lorsque les deux courants i_1 et i_2 se rapprochent de $1/2\ i$ et lorsque les deux tensions e_1 et e_2 se rapprochent de $1/4$ V, il convient de régler l'excitation indépendante des moteurs de manière que, à la descente de la pente avec la vitesse souhaitée, les enroulements du groupe de réglage fonctionnent à peu près dans ces conditions optima. On peut de cette manière réduire, dans une certaine mesure, l'importance dudit groupe dans le cas de freinages en pente prolongés.

Avec les moteurs série employés exclusivement comme moteurs, quand on suspend le démarrage ou la marche sous pleine tension à un cran quelconque du contrôleur en ramenant le cylindre de celui-ci au point mort, et qu'on veut ensuite reprendre le démarrage ou la marche en ramenant le contrôleur à un certain cran, le courant absorbé par les moteurs en correspondance du passage par les premiers crans dépend de la vitesse actuelle du train, qui peut être inférieure ou supérieure à celle atteinte au moment où l'on a suspendu le fonctionnement des moteurs.

Si la vitesse a diminué, le courant peut devenir suffisant pour fournir au train une certaine accélération dès les premiers crans. Si la vitesse a augmenté, le courant est tout d'abord minime, et plusieurs

Digitized by Google

crans peuvent être dépassés avant d'obtenir une accélération sensible.

Sauf une certaine perte de temps dans ce second cas, aucun inconvénient sérieux ne peut se produire après le retour du contrôleur au point mort.

Mais si on avait gardé le contrôleur au dernier cran utilisé, si on avait interrompu le courant, par exemple en ouvrant l'interrupteur principal, et si on essayait ensuite de reprendre le démarrage ou la marche en refermant cet interrupteur, dans le cas où la vitesse aurait entretemps diminué, il pourrait se produire un fort à-coup de courant, susceptible de nuire aux moteurs et imprimant au train une secousse longitudinale désagréable aux voyageurs.

Avec les moteurs transformés en générateurs à excitation indépendante (surtout sans contre-compound), le commencement du freinage, ainsi que la reprise du freinage après une suspension de cette opération, peuvent présenter des inconvénients plus sérieux encore.

La tension aux bornes de ces générateurs dépend de la vitesse actuelle du train et de l'excitation qui leur est appliquée. Sans précautions particulières, au commencement du freinage, cette tension V_m pourrait dépasser de beaucoup, ou bien être inférieure à la tension V du réseau; à la reprise du freinage, après une suspension d'une certaine durée, cette tension V_m pourrait dépasser de beaucoup ou bien être inférieure à la tension V_g que lui opposait le groupe de reglage au moment de la dite suspension. En appliquant de nouveau aux moteurs, soumis à la même excitation indépendante, la tension V du réseau, dans le premier cas, ou la même tension V_g du groupe, dans le second cas, sans autres précautions, on peut déterminer, ou bien un fort à-coup de courant résistant, pouvant nuire aux moteurs et donner une secousse longitudinale au train, ou bien un afflux de courant moteur, contrariant la volonté du conducteur et secouant le train dans le sens inverse, selon que la tension V ou V_g que l'on vient appliquer aux moteurs est de beaucoup inférieure ou quelque peu supérieure à leur tension V_m.

A ces inconvénients on peut remédier au moyen de relais ayant pour but, d'abord, d'empêcher les connexions entre moteurs et réseau ou groupe de réglage tant dans le cas où la différence $V_m - V$ ou $V_m - V_g$ serait négative que dans celui où elle serait positive mais supérieure à une certaine limite v; ayant pour but, ensuite, soit de réduire l'excitation indépendante fournie aux moteurs, soit de faire passer la tension V_g du groupe d'une valeur à une autre, selon le cas.

Digitized by Google

Les équipements essayés en 1924 et en 1926 dont il sera question plus loin, étaient munis de pareils relais. On leur a fourni des occasions de fonctionner et on a pu les mettre au point. Les équipements expédiés au Subway de Buenos-Ayres en sont pourvus, quoique l'un d'eux soit probablement destiné à rester inactif en raison de la courte distance entre stations et du manque de déclivités qui éviteront toute accélération excessive du train, et par suite toute augmentation excessive de V_m.

Mais un autre procédé, plus radical, a été imaginé depuis qui, non seulement évite tous les inconvénients de la nature de ceux indiqués ci-dessus, tant au freinage qu'au démarrage ou à leur reprise dans toutes les conditions possibles, mais encore augmente, en toutes circonstances, la promptitude avec laquelle l'équipement répond à la volonté du conducteur.

Il résulte que cette promptitude n'est pas seulement un élément de plus grande sécurité mais, encore un élément de plus grandes économies d'énergie.

8. — *Autres emplois du subdiviseur de tension.*

Il va sans dire que tout système de réglage approprié à la traction peut être employé au levage des poids, à l'extraction dans les mines, au laminage des métaux, au contrôle des moteurs à vitesse amplement variable exigés par certaines industries, etc.

Le subdiviseur de tension peut encore être employé au contrôle des batteries d'accumulateurs fonctionnant en tampon, ainsi qu'à la charge à fond et à la décharge à fond des batteries en général. Il offre même dans ce cas, outre l'avantage d'une certaine économie par rapport aux autres systèmes connus, des avantages particuliers sur lesquels nous ne nous attarderons pas ici. Evidemment, il demande la subdivision de la batterie en deux parties égales, de manière à pouvoir constituer avec elle un système symétrique, comme dans le cas de contrôle des moteurs.

C'est cette symétrie qui confère au système A. D. R. les avantages qu'il présente par rapport au système Ward-Leonard.

9. — *Charges, rendements, pertes.*

La durée du parcours d'une section de tramway ou de chemin de fer à interstations courtes peut être décomposée en plusieurs périodes élémentaires, en nombre différent selon la nature des organes de ré-

Digitized by Google

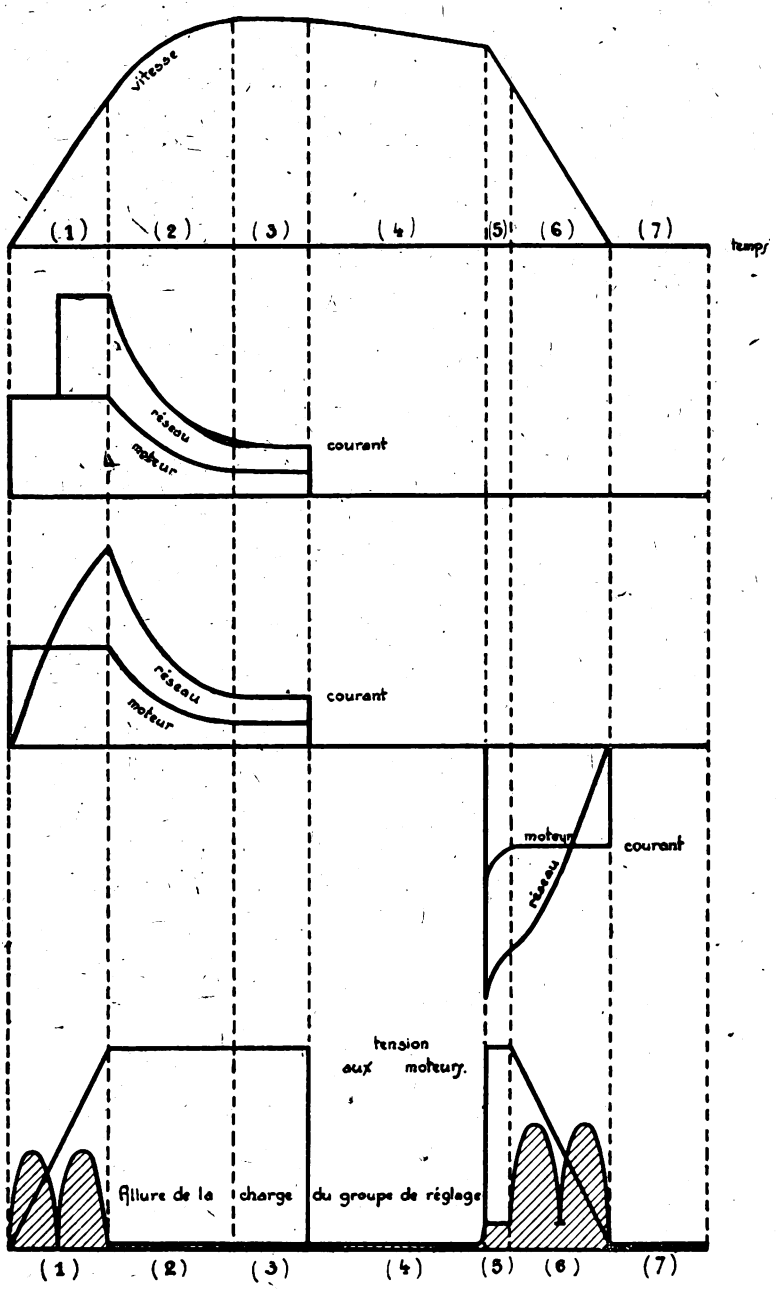


Fig. 10. — Charge du groupe de réglage aux différentes périodes du démarrage et du freinage.

Digitized by Google

glage entrant en jeu. Dans le cas d'équipements à récupération à subdiviseur de tension, les périodes en question peuvent s'élever à sept, de la manière suivante : (fig. 10).

1) Période de démarrage sous une tension inférieure à celle du réseau, procurée aux moteurs par le subdiviseur de tension ($v < V$).

2) Période de démarrage sous la pleine tension du réseau, les moteurs étant plus ou moins excités, sans intervention du subdiviseur qui marche à vide ($v = V$).

3) Période de marche sous courant, constant ou variable selon les déclivités et les courbes de la voie. Subdiviseur inactif ($v = V$).

4) Période de marche sans courant ou à la dérive. Subdiviseur inactif ($v = 0$).

5) Période de freinage sous la pleine tension du réseau, les moteurs fonctionnant comme générateurs étant moins ou plus excités. Le subdiviseur fonctionnant seulement comme moteur actionne l'excitatrice qui alimente certains champs des moteurs de traction ($v = V$).

6) Période de freinage sous une tension inférieure à celle du réseau, procurée aux moteurs par le subdiviseur de tension ($v < V$).

7) Période d'arrêt. Subdiviseur inactif ($v = 0$).

Dans le cas des équipements à freinage électrique en général et à récupération en particulier, les moteurs devant travailler non seulement comme tels, mais encore comme générateurs, sont plus longtemps en charge et doivent présenter une capacité plus élevée. En général, le supplément de capacité doit être de 26 à 42 pour cent, selon les circonstances.

Dans le cas des équipements à subdiviseur de tension, celui-ci intervient comme tel au cours de deux périodes seulement (1 et 6) et comme simple moteur au cours d'une troisième période (5). Il marche à vide pendant les quatre autres périodes. Il fonctionne donc en charge beaucoup moins longtemps que les moteurs qui ont à travailler en général pendant cinq périodes.

L'économie d'énergie que l'on peut obtenir moyennant l'emploi des équipements à subdiviseur de tension résulte :

de l'économie d'énergie réalisée pendant la première période de démarrage (1), du fait de la substitution du subdiviseur aux résistances de démarrage ordinaires;

de la récupération de l'énergie réalisée pendant les deux périodes de

Digitized by Google

freinage (5, 6) et rendue possible d'abord par l'intervention de l'excitatrice seule, et ensuite par l'intervention de celle-ci et du subdiviseur comme tel;

sous déduction des pertes dans le groupe subdiviseur-excitatrice marchant à vide pendant quatre périodes (2, 3, 4, 7) et à faible charge pendant une cinquième période (5).

Envisageons particulièrement les chemins de fer métropolitains et supposons que le rendement optimum des moteurs, fonctionnant comme tels, puisse osciller, selon leur puissance et leur nature entre les deux limites de 0,85 et 0,90. Dans ces conditions, le rendement moyen du système moteurs-groupe doit également osciller entre deux limites à chaque période de fonctionnement.

Ainsi, au cours de la première période de démarrage (1), le rendement moyen du système moteur-subdiviseur pourra osciller entre 0,78 et 0,84. (Dans le cas des équipements rhéostatiques, au cours de la même période, le rendement moyen du système moteurs-résistances oscille ordinairement entre 0,60 et 0,67).

Au cours de la première période de freinage (5), le rendement moyen du système moteurs-excitatrice pourra osciller entre des limites analogues, 0,78 et 0,84; il dépend des étapes d'affaiblissement des champs des moteurs à employer d'après la vitesse maximum à laquelle commence le freinage sous la pleine tension du réseau.

Au cours de la deuxième période de freinage (6), le rendement moyen du système moteurs-excitatrice-subdiviseur pourra osciller entre 0,70 et 0,74, si cette période de freinage commence à une vitesse assez élevée pour avoir à utiliser les étapes de tension les plus élevées que peut fournir le subdiviseur, mais il diminuera de manière à osciller entre 0,50 et 0,53 seulement, si cette période de démarrage commence à une vitesse plus réduite ne permettant d'utiliser que les derniers échelons de tension fournis par le subdiviseur.

Quant à la marche à vide du subdiviseur, revenant aux deux exemples envisagés au paragraphe 5, elle absorbe 2 250 watts s'il s'agit d'une motrice de 30 à 36 tonnes, 3 000 watts s'il s'agit d'une fraction de train de 70 à 75 tonnes; la perte d'énergie occasionnée par cette marche à vide est donc de 75 à 40 watts par tonne déplacée, soit de 0,02 à 0,01 watt-heure environ par tonne et par seconde.

10. — *Equipements employés aux essais.*

Deux équipements avec réglage des moteurs système A. D. R. pour

Digitized by Google

motrices de trains à unités multiples, avec interconnexions électriques pour commande à distance entre motrice et motrice, avec dispositifs électro-pneumatiques pour la manœuvre des inverseurs et des combinateurs, ont été construits et essayés à plusieurs reprises.

D'abord le contrôle était fait à la main, c'est-à-dire que le passage d'une connexion à l'autre et d'une excitation à la suivante était déterminé par la volonté du conducteur, tant au freinage qu'au démarrage.

Ensuite ces deux équipements furent transformés pour les adapter à un contrôle automatique, c'est-à-dire que le passage d'une connexion à l'autre et d'une excitation à la suivante, tant au démarrage qu'au freinage, était déterminé par le fonctionnement de deux relais à minimum de courant, le conducteur ayant la faculté de prédéterminer quelques positions d'arrêt de cette manœuvre automatique.

Ces équipements, destinés au Subway de Buenos-Ayres, furent construits pour l'application d'une tension de 1 000 à 1 100 volts.

Dans le dit chemin de fer souterrain, les trains se composent exclusivement de motrices, du poids moyen de 33 tonnes en service chacune.

Les dits équipements furent essayés sur le chemin de fer aérien de Hambourg, où la tension de service varie entre 750 et 800 volts. Par suite de l'application de cette tension inférieure aux groupes de réglage et aux moteurs, les courants furent exagérés dans la proportion de 153 à 100 et les pertes ohmiques le furent dans la proportion de 177 à 100.

Les essais de bon fonctionnement des équipements en parallèle furent faits au moyen d'une unité de deux motrices; mais les essais de consommation furent faits avec chaque motrice séparément.

Dans le cas d'un train de plusieurs voitures, la résistance frontale de l'air, qui s'ajoute à la résistance due aux différents frottements, se répartit sur un plus grand nombre de tonnes que dans le cas d'une voiture unique; il s'en suit que, d'une part le travail à accomplir pour la traction est plus grand, et que, d'autre part le travail résiduel susceptible d'être utilisé pour la récupération est plus petit, par tonne, dans le cas d'une voiture unique que dans le cas de plusieurs voitures à la queue l'une de l'autre. D'où un double désavantage pour le système à récupération dans sa comparaison avec le système rhéostatique ordinaire.

La comparaison entre les consommations avec les deux sortes d'équipements fut toujours faite au moyen des mêmes voitures, des

Digitized by Google

mêmes moteurs, des mêmes instruments de mesure et du même personnel.

Les équipements avec contrôle à la main furent essayés en 1924. Les différents organes de ces équipements prirent la place des différents organes des équipements ordinaires, sous les planchers des voitures. Les motrices avec équipement ordinaire pesaient 25,8 tonnes; avec équipements à récupération, elles pesèrent 26,8 tonnes.

Des parcours de 400, 575, 900 et 1 000 mètres et autres furent répétés de nombreuses fois, toujours dans un sens et dans l'autre pour compenser l'effet des déclivités et du vent.

Les équipements transformés pour contrôle automatique furent essayés en 1926. Les différents organes de ces équipements furent installés à l'intérieur des voitures, les différents organes des équipements ordinaires gardant leurs places sous la voiture. Les motrices avec les deux équipements pesaient de 29 à 30 tonnes.

Des parcours de 400, 600, 800 et 1 000 mètres et autres furent encore répétés de nombreuses fois, toujours dans les deux sens.

Les consommations constatées dans le cas du contrôle à la main se ressentent de la possibilité qu'avait le conducteur de démarrer et de freiner plus ou moins énergiquement; elles correspondent à une série de vitesses peu homogènes.

Celles constatées dans le cas du contrôle automatique correspondent à des démarrages bien uniformes et à des freinages également uniformes dans les parties communes, ces freinages étant d'ailleurs d'autant plus énergiques au début qu'ils commençaient à une vitesse plus élevée.

11. — *Résultats des essais.*

Dans le cas du contrôle à la main, en 1924, on obtient les résultats suivants :

Section de 400 mètres.			
Le parcours étant effectué en	62	58	54 secondes;
Par réglage rhéostatique on consomma	530	590	680 Wh.
Par réglage récupératif on consomma	365	385	405 Wh.
Economie brute pour cent	31	35	40,5

Digitized by Google

Section de 575 mètres.

Par réglage rhéostatique le parcours fut fait, en moyenne, en 75 secondes et l'on consomma, en moyenne, 611 Wh.

Par réglage récupératif le parcours fut fait, en moyenne, en 70 secondes et l'on consomma 460 Wh en moyenne.

D'où une économie brute de 25 pour cent en énergie et de 8 pour cent en durée.

Section de 900 mètres.

Par réglage rhéostatique le parcours fut fait, en moyenne, en 98,7 secondes et l'on consomma, en moyenne, 925 Wh.

Par réglage récupératif le parcours fut fait, en moyenne, en 96,5 secondes avec une consommation moyenne de 642 Wh.

D'où une économie brute de 32,5 pour cent en énergie et de 2 pour cent en durée.

Section de 1 000 mètres.

Par réglage rhéostatique le parcours fut fait, en moyenne, en 103,4 secondes avec une consommation moyenne de 1 129 Wh.

Par réglage récupératif le parcours fut fait, en moyenne, en 103,3 secondes avec une consommation moyenne de 654 Wh.

D'où une économie brute de 42 pour cent en énergie.

Comme l'auto-transformateur consomme, pour tourner à vide, une puissance de 2,250 kilowatts, un arrêt de 15 secondes à la fin du parcours augmente la consommation de 9,6 Wh.

Si l'on ajoute 10 Wh aux consommations inscrites plus haut, les dites économies brutes de

31, 35, 40,5, 25, 32,5, 42 pour cent,

deviennent respectivement des économies nettes de

29, 33, 39, 23, 31,5, 41,5 pour cent.

Grosso modo l'économie moyenne fut donc de 33 pour cent environ, en énergie, abstraction faite des économies de temps rapportées plus haut.

Dans le cas du contrôle automatique, en 1926, on obtint les résultats suivants :

Longueur de section en mètres	400	600	800	1 000
Durée du parcours en secondes	57,5	77,5	95,0	110,0
Economie nette pour cent	36,8	34,0	32,0	30,2

L'économie moyenne dépassa donc encore 33 pour cent, malgré les

Digitized by Google

conditions défavorables dans lesquelles furent faits les essais, et que nous avons indiquées plus haut.

Les économies constatées en 1924, se rapportaient aux consommations correspondant à deux voitures de poids différents (25,8 et 26,8 tonnes). Les économies constatées en 1926 se rapportent aux consommations correspondant à une voiture de poids invariable (29 à 30 tonnes).

Ni dans un cas, ni dans l'autre, le poids des motrices utilisées pour les essais, ne coïncidait avec le poids moyen des motrices auxquelles les équipements étaient destinés.

En dehors de la comparaison entre la consommation d'énergie dans le cas d'emploi du réglage rhéostatique et dans celui d'emploi du réglage récupératif, les essais indiqués et d'autres ultérieurs fournirent d'autres résultats intéressants, parmi lesquels nous noterons les suivants :

a) Il fut démontré qu'il était superflu de chercher à étouffer les courants de court-circuit dans les enroulements A et D, B et C du groupe et dans les induits des moteurs M et N par des résistances additionnelles *ad hoc*.

b) Il fut démontré qu'il était inutile de subdiviser la tension de 1 000 volts en 16 échelons, et que 12 échelons étaient amplement suffisants. Pour une tension de 600 volts, 8 échelons seront suffisants.

c) Il fut démontré que les moteurs de Hambourg, transformés en générateurs à excitation indépendante et contre-compoundés, fonctionnaient même au commencement des freinages aux vitesses les plus élevées, sans retard et sans étincelles sensibles au collecteur.

d) La vitesse de rotation du groupe et de l'excitatrice, dont les variations étaient d'abord exagérées par l'application d'une tension plus petite et d'un courant plus fort que leurs valeurs normales (puisque $k\Phi N$ varie de $1/2\ V + ri$ à $1/2\ V - ri$) put être régularisée et les effets de ses variations rendus insignifiants par l'adoption de quelques-unes des dispositions qui ont été indiquées.

e) Les variations de tension sur le réseau, la suppression par endroits du conducteur amenant le courant, n'occasionnèrent pratiquement aucun trouble. Le dispositif de sécurité destiné à éviter tout accident dans le cas de manque total et prolongé de tension pendant un freinage fonctionna régulièrement.

Digitized by Google

f) Il en résulta encore que plusieurs organes de l'équipement, dessiné dans toutes ses parties avec la plus grande prudence et la plus grande largesse, pouvaient être rendus moins puissants et construits plus simplement, avec un avantage sensible sous le triple point de vue de l'encombrement, du poids et du prix de revient.

On est donc fondé à penser que le système en question est apte, non seulement à fournir une économie d'énergie et d'autres dépenses vraiment intéressantes, mais à donner, en exploitation courante, autant de satisfaction que le système ordinaire au point de vue du bon fonctionnement en toutes circonstances.

12. — *Remarques diverses. — Vitesse commerciale.*

En pratique, un train pourvu de motrices à récupération pourra peser de 3 à 6 pour cent de plus que le train pourvu de motrices ordinaires. Mais, par contre, les pertes d'énergie entre les motrices et les sous-stations d'alimentation du réseau à courant continu seront plus faibles dans le cas d'emploi de motrices à récupération que dans celui d'emploi de motrices ordinaires, car chaque motrice à récupération devenant de temps à autre une sous-station auxiliaire de transformation, les points d'alimentation de l'ensemble se trouvent être multipliés et rapprochés. En outre, la tension moyenne sur le réseau est accrue, avec un certain avantage pour la vitesse moyenne des trains. Vraisemblablement, les pertes sur le réseau de distribution, dont la moyenne varie entre 6 et 12 pour cent, seront au moins réduites de moitié. De manière que la diminution sur ce poste compense à très peu près l'augmentation sur le poste précédent.

Il est à remarquer que, dans le cas d'un réseau de tramways où les motrices sont déjà munies d'un système de freinage électrique (comme la tendance s'en est fait jour dans certains pays), la comparaison peut devenir encore plus favorable à l'emploi de la récupération que dans le cas où les motrices ne sont pas munies d'un pareil système de freinage. En effet, l'emploi du freinage électrique a déjà porté la puissance des moteurs au niveau requis par l'emploi de la récupération, et les suppléments de poids et de prix à considérer, en passant des équipements en service à ceux à récupération, se bornent aux suppléments relatifs à la seule addition du groupe de réglage.

Digitized by Google

L'emploi d'un système à récupération, qui est un système à freinage électrique comme un autre, mais plus profitable, présente, en dehors de l'économie en énergie électrique, de nombreux avantages d'autre nature qui se rapportent aux jantes des roues, aux sabots des freins, aux timonneries, aux compresseurs et aux réservoirs d'air, aux tuyauteries, aux rails de roulement, dont l'usage et l'usure se trouvent réduits. Ces avantages, dont bénéficie l'exploitant du chemin de fer, compensent et au delà l'augmentation des frais d'entretien occasionnés par un équipement quelque peu plus compliqué.

Mais le producteur d'énergie électrique — qui perd, il est vrai, une partie de sa fourniture — peut également constater certains avantages provenant d'une meilleure utilisation de toutes ses installations de production, de transport et de transformation, avantages sur lesquels nous ne nous étendrons pas.

Un autre avantage considérable que l'on peut tirer de l'application d'un système de traction à récupération bien conçu consiste dans la possibilité d'augmenter la vitesse moyenne de marche et, conséquemment, la vitesse commerciale des trains à très bon compte.

Si l'on se rapporte, en effet, aux résultats obtenus en 1924 sur une section de 400 mètres, on voit que le contrôle rhéostatique exige une consommation supplémentaire d'énergie de 60 Wh et de 90 Wh (la voiture pesant 25,8 tonnes) pour réduire la durée du parcours de 62 à 58 et de 58 à 54 secondes; alors que le contrôle à récupération ne demande qu'une consommation supplémentaire de 20 Wh dans un cas comme dans l'autre (la voiture pesant 26,8 tonnes).

A la suite d'une recherche particulière que nous avons eu l'occasion de faire, nous avons trouvé les résultats numériques suivants, que nous ne rapportons qu'à titre d'indication.

Interstation —	Vitesse comm. —	Syst. Rh. —	Syst. ADR —	Syst. Rh. —	Syst. ADR —
mètres	km/h	kWh/T.km	kWh/T.km	Chevaux	Chevaux
400	19,80	46,0	31,0	82	108
	22,10	80,0	46,0	96	138
500	21,05	37,5	27,0	76	98
	24,25	62,0	37,5	90	124
600	22,10	32,0	24,0	72	91
	25,85	50,0	32,0	84	114

Ce tableau montre qu'à égalité d'interstation, l'emploi du système

Digitized by Google

à récupération présente, par rapport à l'emploi du système rhéostatique, une économie d'énergie croissante avec la vitesse commerciale; mais le supplément de puissance que doivent posséder les moteurs augmente également. Cette économie et ce supplément de puissance diminuent d'ailleurs lorsque l'interstation augmente.

A égalité de vitesse commerciale, l'économie varie de 42,5 à 25,0 pour cent et le supplément de puissance de 42 à 26 pour cent, selon les circonstances.

A égalité de consommation de courant, l'augmentation de la vitesse commerciale varie de 12 à 17 pour cent et le supplément de puissance de 58 à 68 pour cent, selon les circonstances.

Lorsque elle est réalisable, une augmentation de la vitesse commerciale, sans grande augmentation des frais d'exploitation, constitue un résultat beaucoup plus intéressant qu'une diminution des frais d'exploitation, encore que cette diminution porte sur deux postes aussi importants que le coût de l'énergie consommée et que les dépenses d'entretien de tous les organes intéressés au freinage mécanique.

En effet, une augmentation de la vitesse commerciale, sans augmentation de la consommation d'énergie, signifie une meilleure utilisation de toutes les installations de production, de transmission, de transformation et de distribution de l'énergie, une meilleure utilisation du matériel roulant et de la voie, une meilleure utilisation du personnel.

On peut dire encore qu'une augmentation de la vitesse commerciale signifie une augmentation de la recette, presque sans augmentation de la dépense.

En pratique, il sera parfois difficile de renoncer à toute économie d'énergie pour adopter la vitesse commerciale correspondant à une même consommation d'énergie, car cette vitesse sera parfois limitée par plusieurs facteurs.

Mais il sera souvent possible d'adopter une solution intermédiaire, consistant dans la réalisation d'une partie de l'économie d'énergie possible à égalité de vitesse, et d'une partie de l'augmentation de vitesse possible à égalité de consommation d'énergie.

13. — *Consommation et récupération d'énergie.*

On sait que, si l'on considère un parcours déterminé L effectué en un temps déterminé T, la consommation d'énergie varie, dans le cas de la traction ordinaire, en rapport avec l'accélération moyenne adoptée

Digitized by Google

pour le démarrage et avec le ralentissement moyen adopté pour le freinage; elle diminue au fur et à mesure que ces deux grandeurs s'élèvent.

La même chose se produit dans le cas de la traction à récupération, mais les variations de la consommation sont sensiblement plus restreintes.

Ainsi, sur un parcours d'environ 420 mètres effectué en 60 secondes, si l'on fait varier ces deux grandeurs dans le rapport approximatif de 100 à 150, la consommation tombe approximativement dans le rapport de 100 à 80 dans le cas de la traction ordinaire et de 100 à 95 dans le cas de la traction à récupération.

Si, par contre, on suppose que ces deux grandeurs gardent toujours les mêmes valeurs et si l'on fait varier la durée T du parcours L, la consommation augmente au fur et à mesure que la valeur de la grandeur $A = L/T^2$ devient de plus en plus grande, mais les variations de la consommation sont plus sensibles dans un cas comme dans l'autre.

En effet, sur un parcours d'environ 420 mètres effectué dans un temps de plus en plus bref, de 65 à 57 secondes, de manière que cette grandeur A varie dans le rapport approximatif de 100 à 130, la consommation s'élève approximativement dans le rapport de 100 à 133 dans le cas de la traction ordinaire, et de 100 à 107 dans le cas de la traction à récupération.

Quoique nous ayons pris comme exemple un parcours de 420 mètres et des durées de 65, 60 et 57 secondes, les remarques que nous venons de faire ont un caractère tout à fait général.

En effet, si l'on fait les hypothèses : (*a*) que les efforts de traction soient à peu près indépendants de la vitesse; (*b*) que les pertes intérieures des moteurs et des appareils connexes qui servent à leur réglage, tant au freinage qu'au démarrage, si c'est le cas, soient proportionnelles aux puissances de ces moteurs ou capacités de ces appareils connexes, on peut démontrer facilement le théorème approximatif suivant :

« Les quantités d'énergie unitaires (watt-heures par tonne-kilomètre) à dépenser, que l'on se serve d'un système simplement moteur, fonctionnant exclusivement pendant le démarrage et la marche normale du train, ou que l'on se serve d'un système moteur et récupérateur fonctionnant en outre comme régénérateur d'énergie électrique pendant le freinage, sont les mêmes pour tous les diagrammes vitesse-temps géométriquement semblables ».

Digitized by Google

« Il en va naturellement de même pour la différence absolue entre ces quantités d'énergie à dépenser (économie absolue due à la récupération), et pour leur différence relative (économie relative) ».

Il y a lieu de remarquer qu'à des diagrammes vitesse-temps géométriquement semblables, correspond nécessairement une même valeur de la grandeur A, comme de toute accélération ou ralentissement effectifs.

C'est donc avec une très grande généralité que l'on peut dire :

1° Que la variation de la grandeur $A = L/T^2$ influe sur la consommation beaucoup plus qu'une variation de même importance de l'accélération moyenne au démarrage ou du ralentissement moyen au freinage; cette grandeur théorique A — qui possède les mêmes dimensions que ces deux grandeurs pratiques — mérite donc d'être prise en considération d'une manière toute spéciale.

2° Qu'à égalité de variation, soit de l'accélération et du ralentissement moyens, soit de cette grandeur caractéristique A, la consommation d'énergie varie beaucoup moins dans le cas de la traction à récupération que dans le cas de la traction ordinaire.

Il est facilement compréhensible que si le conducteur conduit son train de manière à atteindre des vitesses maxima plus ou moins élevées, l'énergie consommée atteint des valeurs plus ou moins élevées; mais les vitesses résiduelles disponibles à la fin de la marche sous courant ou sans courant sont également plus ou moins élevées, et l'énergie récupérable atteint aussi des valeurs plus ou moins élevées ; par conséquent la récupération effective de l'énergie ne peut qu'atténuer les écarts éventuels de la consommation résultante.

On peut donc dire, d'une manière générale, que la récupération de l'énergie est un régulateur de la consommation d'énergie.

Jusqu'ici, nous nous sommes préoccupés surtout des économies d'énergie possibles sur des chemins de fer à interstations courtes, tels que les métropolitains surélevés ou souterrains.

Mais sur les tramways, les choses ne procèdent pas d'une manière essentiellement différente.

Certes, les deux circonstances, que le coefficient de traction assume des valeurs plus élevées sur rails à gorge que sur rails à champignon, et que la vitesse au commencement du freinage (au carré de laquelle est proportionnelle la quantité d'énergie utilisable pour la récupéra-

Digitized by Google

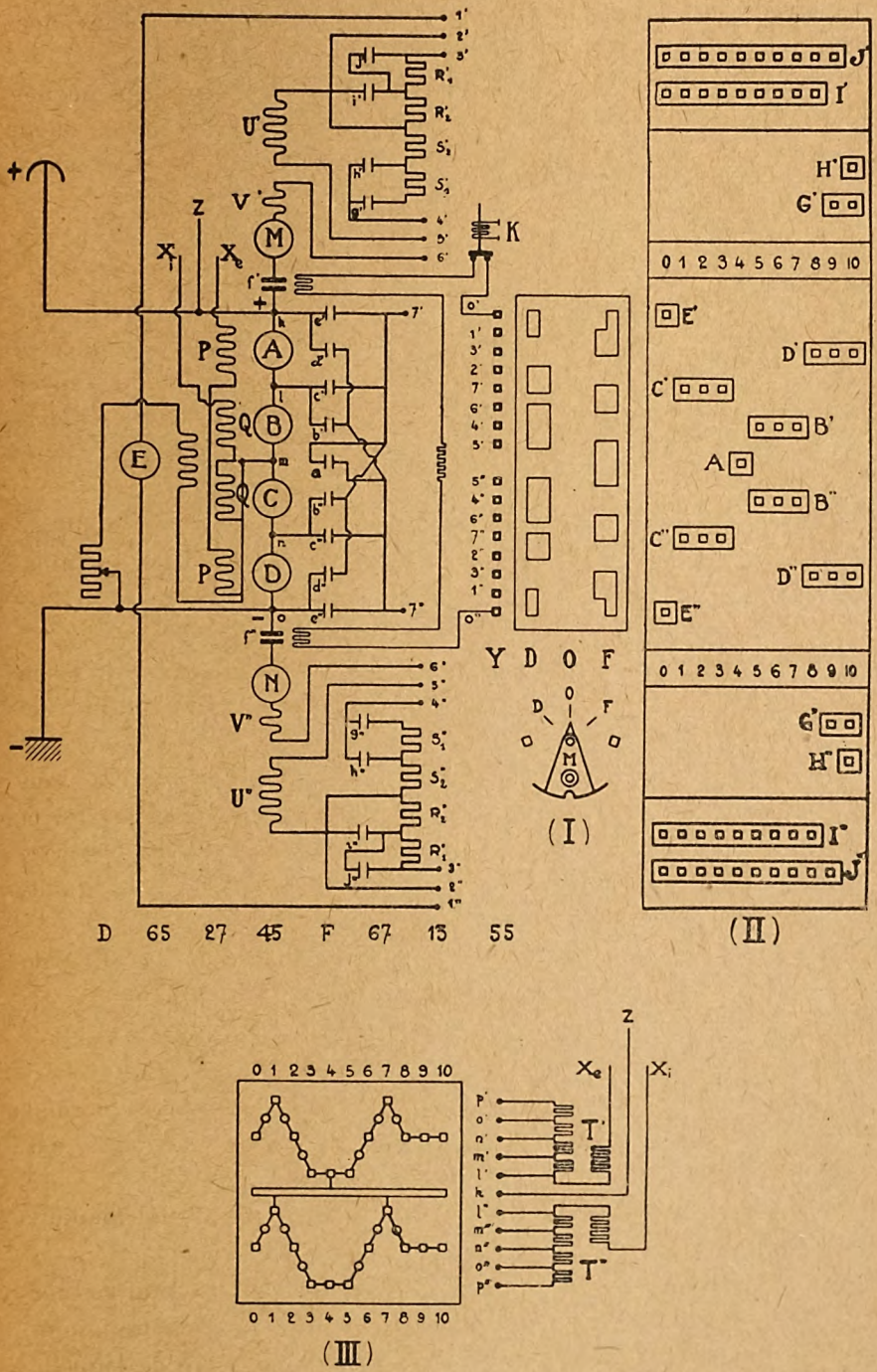


Fig. 11. — Dispositif spécial à contacteurs et arbre à cames.

Digitized by Google

tion) atteint des valeurs moins élevées dans les tramways que dans les chemins de fer, agissent dans un sens défavorable à l'application de la récupération; mais par contre les deux circonstances, que les intervalles entre arrêts successifs sont plus réduits sur les lignes de tramway que sur les lignes de chemin de fer urbaines (généralement de 250 à 350 mètres, au lieu de 400 à 600), et que fréquentes sont les occasions de freinage partiel entre deux arrêts effectifs, agissent dans un sens favorable à l'application de la récupération. Aussi peut-on compter sur une économie d'énergie de 25 à 30 pour cent sur les tramways parcourant les villes plates.

Sur les tramways parcourant des villes accidentées, l'économie d'énergie peut dépasser ces proportions.

Sur des tronçons de lignes à forte déclivité parcourus sans arrêts, l'économie d'énergie varie encore d'après le genre de moyen de transport.

Si l'on considère une montée et une descente sous des vitesses de régime appropriées, et si on néglige les économies possibles au démarrage et au freinage final, on trouve comme réalisables les résultats suivants :

Sur chemin de fer (effort de traction de 5 kg/T) — déclivités de 15, 30, 45 pour mille — économies correspondantes 26, 39, 44 pour cent.

Sur tramway (effort de traction de 9 kg/T) — déclivités de 30, 55, 80 pour mille — économies correspondantes 22,5, 32, 36 pour cent.

Ces chiffres tiennent compte déjà du poids supplémentaire présenté par les équipements à récupération par rapport aux équipements rhéostatiques. Ils n'ont d'ailleurs que la portée d'une indication.

Dans le cas d'une longue déclivité isolée, il convient d'affecter un ou plusieurs tracteurs spéciaux à l'exploitation de ce tronçon, au lieu de modifier la totalité des équipements en service.

14. — *Description d'un équipement spécial.*

La figure 11 représente un schéma partiel de l'équipement supposé à contacteurs actionnés par un arbre à cames, dans l'hypothèse que les étapes de tension entre O et V soient huit (et non plus 12 comme dans l'exposition précédente), huit étapes étant suffisantes pour une tension de service V de 600 volts.

Digitized by Google

A, B, C, D sont les quatre enroulements induits du subdiviseur de tension; P, P et Q, Q sont les deux champs et T', T'' les deux rhéostats de champ du groupe; les deux champs sont intercalés avec leurs rhéostats entre la borne de milieu m du subdiviseur et la borne positive de réseau.

E est l'excitatrice entraînée par le subdiviseur; son champ et son rhéostat sont intercalés entre le même point de milieu m et la borne négative du réseau.

M et N sont deux moteurs, normalement excités en série, dont le champ est décomposé en deux parties, l'une plus petite (V' et V'') toujours connectée à l'armature correspondante, l'autre plus grande (U' et U'') et séparable de la précédente.

Pendant le démarrage et la marche normale, les deux parties (V' et U'; V'' et U'') de chaque champ sont connectées en série.

Pendant le freinage, lorsque les moteurs ont à fonctionner comme générateurs, les parties plus petites (V' et V'') constituent des contre-compounds, et les parties plus petites (U' et U'') alimentées par l'excitatrice E fournissent une excitation indépendante aux moteurs. Ceux-ci, ainsi transformés en dynamos contre-compoundées, sont tout à fait adaptés à la régénération de l'énergie électrique.

S'_1, S'_2 et S''_1, S''_2 sont deux paires de résistances pouvant être mises en parallèle avec les enroulements U' et U'' des moteurs M et N; elles sont destinées à affaiblir les champs de ces moteurs à la fin du démarrage et pendant la marche normale, si nécessaire.

R'_1, R'_2 et R''_1, R''_2 sont deux paires de résistances pouvant être mises en série avec les mêmes enroulements sur le circuit alimenté par l'excitatrice; elles sont destinés à affaiblir les champs des moteurs au commencement du freinage, si nécessaire.

f' et f'' sont deux contacteurs destinés à connecter et à déconnecter les moteurs M et N avec les bornes positive et négative du réseau, et du subdiviseur de tension (k et o).

a, b', b'', c', c'', d', d'', e', e'' sont neuf contacteurs destinés à raccorder les moteurs entre eux (a), ou avec les bornes extrêmes (k et o) ou intermédiaires (l et n) du subdiviseur de tension.

g', g'', h', h'' sont quatre contacteurs destinés à shunter ou à déshunter les enroulements U' et U'', au moyen des résistances S.

i', i'', j', j'' sont quatre contacteurs destinés à court-circuiter ou à décourt-circuiter les résistances R, intercalées entre l'excitatrice E et les enroulements U', U''.

Digitized by Google

Seuls, les deux contacteurs f' et f'' ont réellement à couper des courants importants; les neuf suivants servant plutôt à des commutations qu'à autre chose; les huit suivantes n'ont généralement aucun courant à couper.

Si l'excitatrice E alimentait en parallèle les enroulements U' et U'' au lieu de les alimenter en série, non seulement les deux paires de résistances S'_1. S''_1. S'_2. S''_2 mais encore les deux paires de résistances R'_1. R''_1, R'_2. R''_2, pourraient être remplacées par autant de résistances simples; de même les quatre paires de contacteurs g', g'', h', h'', i', i'', j', j'' pourraient être remplacées par quatre contacteurs simples.

L'appareil (I) est un inverseur démarrage-freinage, comportant une rangée Y de 16 doigts de contact, desquels 14, (1' à 7' et 1'' à 7'') sont connectés (par des conducteurs non figurés pour ne pas embrouiller le schéma) avec les bornes homonymes 1', 1'' de l'excitatrice, 2', 5', 6', 2'', 5'', 6'' des moteurs, 3', 4', 3'', 4'' des résistances, 7', 7'' du groupe de réglage et du réseau, et desquels 2, (0' et 0'') sont connectés aux bornes d'un circuit auxiliaire comprenant les enroulements servant à la fermeture des contacteurs principaux f' et f''.

D est une rangée de 6 pièces ou ponts déterminant les liaisons nécessaires pendant le démarrage :

$$— 0'1' — 2'7' — 6'4'5' — 5''4''6'' — 7''2'' — 1''0''.$$

F est une rangée de 5 pièces ou ponts déterminant les liaisons nécessaires pendant le freinage : $— 0'1'3' — 7'6' — 5'5'' — 6''7'' — 3''1''0''$.

Les deux ponts extrêmes de la série D et les parties extrêmes des deux ponts extrêmes de la série F, qui servent à assurer la liaison entre les bornes 1', 1'' de l'excitatrice et les bornes O', O'' du circuit auxiliaire de fermeture des contacteurs principaux f' et f'' des moteurs M et N, ont leur face d'attaque décalée par rapport aux autres, de façon que cette dernière liaison se fasse avec un léger retard ou se défasse avec une légère avance par rapport aux autres liaisons, c'est-à-dire de façon que les liaisons nécessaires au démarrage se fassent avant l'établissement du courant de démarrage et que les liaisons nécessaires au freinage se défassent après la rupture du courant de freinage.

Toutes les liaisons sont interrompues dans la position intermédiaire O de l'inverseur démarrage-freinage. La suspension du démarrage, ou de la marche, ou du freinage, rompt donc nécessairement les excitations des moteurs, ce qui évite toute perte inutile.

A droite de l'appareil (I) figure le développement d'un arbre à cames tournant (II) à onze positions, destiné à fermer aux bons moments les 17 contacteurs autres que f' et f''.

Digitized by Google

Les cames A, B′, B″, C′, C″, D′, D″, E′, E″, G′, G″, H′, H″, I′, I″, J′, J″ correspondent aux contacteurs

$$a,\ b',\ b'',\ c',\ c'',\ d',\ d'',\ e',\ e'',\ g',\ g'',\ h',\ h'',\ i',\ i'',\ j',\ j''$$

placés, dans la figure, à la même hauteur.

Au-dessous de cet arbre à cames (II) figure le développement d'un régulateur (III) des rhéostats T′ et T″ destinés à modifier les excitations du groupe de réglage. Ce régulateur présente également onze positions. Arbre à cames (déterminant les connexions entre groupe de réglage, excitatrice, moteurs et résistances) et régulateur (modifiant les excitations du groupe) sont solidaires de manière à tourner synchroniquement.

Dans les positions 0, 2, 6, 8, 9, 10, les deux paires d'armatures AD et BC présentent aux bornes les mêmes tensions 1/4 V ; dans les positions 1 et 7, elles présentent respectivement les tensions 1/8 V et 3/8 V et dans les positions 3, 4, 5, les tensions 3/8 V et 1/8 V chacune.

Par le jeu de l'arbre à cames, les moteurs M et N sont fermés en court-circuit dans la position 0; dans la position 4, ils sont en série entre eux; dans la position 8 ils sont en parallèle entre les bornes du réseau ou du groupe de réglage; dans les positions 1, 2, 3, 5, 6, 7, la liaison entre moteurs et groupe est faite respectivement sous les tensions 1/8 V, 2/8 V, 3/8 V, 5/8, 6/8 V, 7/8 V, de manière qu'en passant de la position 0 à la position 8, ou vice-versa, les moteurs sont soumis à neuf tensions échelonnées entre 0 et V ou entre V et 0.

Dans les positions 9 et 10 de l'arbre à cames combinateur et du régulateur, les moteurs sont soumis à la pleine tension V du réseau comme dans la position 8, mais leurs champs sont affaiblis de façon à permettre aux moteurs de marcher plus vite dans la position 9 que dans la position 8, et plus vite encore dans la position 10 que dans la position 9. Cet affaiblissement des champs s'opère pendant le démarrage ou la marche sous courant, au moyen des différents shunts S, et pendant le freinage, au moyen des différentes résistances R, la sélection des connexions (destinées à faire intervenir, soit les shunts, soit les résistances) étant opérée par l'inverseur démarrage-freinage.

En effet, dans le cas du démarrage, les connexions 2′ 7′, 4′ 5′ 6′ ne laissent en jeu que les contacteurs h' et g', car la borne 3′ restant isolée, les contacteurs i' et j' peuvent être indifféremment ouverts ou fermés. On voit que, par la fermeture successive des contacteurs g' et h', en passant de la position 8 à la position 9 et de celle-ci à la position 10, c'est d'abord l'ensemble des résistances S'_1 et S'_2 qui shunte l'enroulement U″ du moteur M dans la position 9, et c'est ensuite la

Digitized by Google

seule résistance S'_2 qui shunte cet enroulement dans la position 10, de manière que le moteur M est de moins en moins self-excité.

Et dans le cas du freinage, les connexions 6′ 7′, 5′ 5″ 1′ 3′ ne laissent en jeu que les contacteurs i' et j', car la borne 4′ restant isolée, les contacteurs g' et h' peuvent être indifféremment ouverts ou fermés. On voit donc que par la fermeture successive des contacteurs j' et i', en passant de la position 10 à la position 9 et de celle-ci à la position 8, c'est d'abord la seule résistance R'_1 (en série avec la résistance R'_2 et avec l'enroulement U′ du moteur M) qui est shuntée dans la position 9, et c'est ensuite l'ensemble des résistances R'_1 et R'_2 (en série avec l'enroulement U′) qui est shunté dans la position 8, de manière que le moteur M est de plus en plus excité par l'excitatrice E.

Une partie seulement, bien déterminée, des contacteurs g', h', i', j', et une partie seulement, bien déterminée, des résistances S'_1, S'_2, R'_2, R'_1, entre donc en jeu dans le sens opportun, selon la position donnée à l'inverseur.

15. — *Suite de la description.*

Nous avons dit que la figure représente seulement un schéma partiel de l'équipement. Un schéma complet devrait comprendre plusieurs autres appareils, dont quelques-uns d'usage courant.

Un interrupteur général devrait figurer entre la prise de courant et la borne k du groupe de réglage.

Un inverseur de marche devrait figurer connecté aux armatures des moteurs M et N.

Un démarreur automatique du groupe devrait être intercalé, soit entre la borne k et l'enroulement A, soit entre l'enroulement B et la borne m du groupe, puisque les champs P et Q sont connectés entre k et m en parallèle avec A et B.

Un relais à courant minimum pour le contrôle du démarrage devrait se trouver sur un des conducteurs 2′2′ ou 2″2″ supprimés dans la figure. Un relais à courant minimum pour le contrôle du freinage devrait se trouver sur un des conducteurs 6′6′ ou 6″6″ également supprimés.

Le schéma devrait montrer encore les circuits auxiliaires actionnés par ces relais et commandant respectivement le mouvement de progression ou de régression de l'arbre à cames et du régulateur pendant les périodes de fonctionnement des moteurs.

Il devrait montrer encore le tambour auxiliaire, solidaire avec

Digitized by Google

l'arbre à cames et le régulateur, avec des doigts et des pièces de contact destinés au contrôle des deux dits circuits auxiliaires.

Devrait y figurer encore le dispositif spécial imaginé pour reprendre promptement et sans inconvénients un démarrage ou un freinage momentanément interrompu, et, plus généralement, pour passer promptement et sans inconvénients d'une mode de marche quelconque à une autre mode de marche quelconque.

Sur le circuit o', o'' comprenant les deux enroulements destinés à l'enclanchement et au déclanchement des contacteurs principaux f' et f'', on voit figurer un relais K. Celui-ci est prévu dans un but de sécurité.

Si, pendant le freinage à récupération, un déclanchement extérieur au système formé par les moteurs et le groupe de réglage, isole ce système et lui ôte toute autre manière de débiter l'énergie provenant de l'inertie du train, le groupe de réglage cesse d'être un transformateur et devient un simple moteur marchant à vide sous l'effet de l'énergie électrique, que lui fournissent les moteurs fonctionnant comme générateurs. Il tend alors à s'emballer. Afin d'éviter l'emballement effectif, les contacteurs f' et f'' sont ouverts par l'action du relais K sur le circuit o', o''. Ce relais peut être activé à son tour, soit par un régulateur à force centrifuge porté par l'arbre du groupe de réglage, soit par l'augmentation de la tension aux bornes de l'excitatrice, soit de différentes autres manières.

Mais, au lieu d'ouvrir les contacteurs f' et f'', on peut recourir à plusieurs autres moyens, tels que le remplacement du réseau par une résistance qui absorbe à sa place l'énergie électrique débitée par le groupe, ou la connexion de deux résistances en parallèle avec les moteurs, ou la réduction du courant d'excitation fourni par l'excitatrice aux moteurs, ou la manœuvre du frein à air, etc. On peut même adopter plusieurs de ces mesures à la fois.

16. — *Manœuvre à faire par le conducteur.*

En ce qui concerne la manœuvre à faire par le conducteur du train, elle ne peut évidemment pas être identique dans les deux cas d'emploi des équipements ordinaires et des équipements à récupération. Mais, avec les équipements à subdiviseur de tension, du dernier type étudié surtout, cette manœuvre est excessivement facile et peut devenir rapidement instinctive.

En effet, après avoir mis en marche d'abord le groupe auxiliaire de

Digitized by Google

la motrice de tête — dont l'excitatrice fournira le premier courant auxiliaire — et ensuite les groupes auxiliaires des autres motrices, le conducteur n'a plus qu'à opérer sur un contrôleur très simple destiné à transmettre des mouvements tout à fait analogues aux différents inverseurs démarrage-freinage du train.

La manivelle de ce contrôleur est susceptible d'assurer trois positions : O (au milieu), D (à droite, par exemple), F (à gauche, par exemple). Sur la poignée de cette manivelle surgit un bouton de fermeture d'un circuit auxiliaire spécial. Et voici ce qui se produit :

Position O : Repos.

Position D : Démarrage ou accélération progressive sous le contrôle d'un relais à courant minimum.

Position D′ : En pressant le bouton on stabilise la marche selon une caractéristique déterminée quelconque.

Position O : Le courant est coupé.

Position F : Freinage ou ralentissement progressif sous le contrôle d'un relais à courant minimum.

Position F′ : En pressant le bouton on stabilise la marche selon une caractéristique déterminée quelconque.

Position O : Le courant est coupé.

En lâchant le bouton on revient de la condition D′ ou F′ à la condition D ou F. Prise avant la fin du démarrage, ou pendant la marche, ou avant la fin du freinage, la position O détermine la marche à la dérive.

Comme on le voit, on ne peut rien imaginer de plus simple.

17. — *Résultats financiers.*

Examinons maintenant, d'une manière grossière, les résultats financiers et commerciaux que peut entraîner, dans le cas d'un chemin de fer urbain, l'emploi d'équipements nouveaux économiques à la place d'équipements ordinaires rhéostatiques.

Considérons un chemin de fer métropolitain dont les trains, pesant environ 150 tonnes, comportent deux motrices de 400 chevaux chacune.

L'équipement ordinaire coûte environ 700 francs par cheval, soit *grosso modo* 280 000 francs. L'équipement économique correspondant d'une puissance de 560 chevaux, coûte environ 750 francs par cheval, soit *grosso modo* 420 000 francs.

L'adoption de cet équipement à la place de l'autre conduit donc à

Digitized by Google

une dépense supplémentaire de 140 000 francs par équipement, ou de de 280 000 francs par train; en fait, la dépense supplémentaire sera moindre en raison de la dépense restant à faire pour l'équipement de freinage à l'air comprimé, et qui sera moindre dans le second cas que dans le premier, parce que le freinage pneumatique devenant purement occasionnel exigera un compresseur moins puissant et un réservoir plus réduit.

Si l'on admet comme nécessaire une réserve de 15 équipements pour 100 équipements en service, il faut tabler sur une dépense supplémentaire globale de 280 000 (1 + 0,15) = 322 000 francs.

Le loyer de l'argent étant supposé de 7 pour cent, et la vie d'un équipement étant supposée de vingt ans, il y a lieu de mettre de côté chaque année, une somme de 9,40 pour cent de 322 000 francs, soit 30 300 francs comme intérêt et amortissement du capital immobilisé.

Admettons que l'augmentation des frais d'entretien des équipements électriques, en passant des équipements ordinaires aux équipements spéciaux, ne soit que compensée par la diminution des frais d'entretien des équipements de freinage et de leurs connexes (compresseur, réservoirs, tuyauteries, timonneries, sabots des freins, jantes des roues, rails de roulement).

Il reste alors à comparer cette charge financière de 30 300 francs au coût de l'énergie économisée.

Ici intervient une considération spéciale.

Comme dans les usines génératrices à vapeur, il convient de se servir de machines économiques au point de vue de la consommation de combustible pour produire les kWh à la base du diagramme de production — même si ces machines sont chères — et de se servir de machines moins coûteuses pour produire les kWh de pointe — même si ces machines consomment d'avantage; — de même il convient de se servir de motrices à récupération — plus chères mais consommant moins d'énergie — pour faire la base du diagramme de trafic, et de se servir de motrices rhéostatiques — consommant plus d'énergie mais moins chères, pour faire les pointes du diagramme de trafic.

Dans un chemin de fer métropolitain, sur un ensemble de 100 trains roulant en moyenne quelques 12 heures par jour, il y en a environ 40 qui roulent (ou qui pourraient rouler) 19 heures par jour.

A la vitesse commerciale de 21 km à l'heure, ces motrices font, aidées par les réserves y afférentes, dont plus haut, un parcours journalier de 400 km et un parcours annuel de 146 000 km.

Digitized by Google

Ce parcours correspond à un déplacement de 21 900 000 tonnes kilomètres par an et par train.

Si la consommation unitaire est de 55 Wh/tkm avec les équipements ordinaires, et se réduit à 37 Wh/tkm avec les équipements spéciaux, à chaque train en service correspond une économie de 394 000 kWh par an, qui, au prix de 0,40 fr/kWh à la sortie des sous-stations, représente une économie de 157 600 francs par an.

Le bénéfice résultant du fait que l'on s'est servi d'équipements spéciaux à la place d'équipements ordinaires, se chiffre donc à 157 000 — 30 300 = 127 300 francs par an et par train en service actif.

Cette annuité mise de côté pendant la vie des équipements, produit, intérêts compris, une réserve de 5 220 000 francs par train.

Dans le cas d'un chemin de fer ayant 500 trains en mouvement aux heures de pointes, et pouvant bien utiliser 200 trains à récupération, on pourrait constituer ainsi une réserve de plus d'un milliard.

En même temps, on éviterait une consommation de charbon d'environ 80 000 tonnes par an, et d'environ 1 600 000 tonnes pendant la vie des équipements. Il est supposé qu'un kWh aux bornes des sous-stations ne correspond qu'à 1,015 kg de charbon seulement.

Dans le cas où, au lieu d'un choix différent, comme il s'en présente l'occasion lors d'une extension du réseau, ou lors d'une augmentation du trafic, ou lors de la mise hors service d'un matériel vieilli et déjà amorti, il s'agirait du remplacement d'équipements ordinaires existants et encore utilisables, par d'autres à récupération, l'immobilisation est naturellement plus élevée que celle indiquée plus haut; elle dépend d'ailleurs de la quantité de matériel faisant partie des équipements en service qui peut être réemployée à la confection des équipements nouveaux.

Dans ce cas la somme accumulée pendant la vie des 200 équipements nouveaux peut descendre jusqu'à 600 000 000 de francs seulement; mais la quantité de combustible épargnée reste la même.

Nous n'avons aucunement l'intention d'attribuer une valeur absolue aux chiffres que nous venons d'enregistrer : nous avons simplement voulu indiquer l'ordre de grandeur des résultats que l'on peut pratiquement atteindre, ordre de grandeur qu'on ne peut même pas soupçonner *à priori*, mais dont il convient que les exploitants aient une idée pour qu'ils se rendent compte de l'importance du problème de la récupération et des autres économies connexes.

L'Imprimeur-Editeur : Etienne CHIRON, Paris.

Digitized by Google

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

RAPPORTS présentés à la Semaine d'Octobre 1927 (1) *(suite)*.

4e *Section* (suite). — La récupération jusqu'à l'arrêt des trains (M. GUÉRY), p. 1131. — Le problème de la sécurité dans les chemins de fer (M. LEMONNIER), p. 1205. — Considérations générales sur la signalisation automatique des chemins de fer (M. LALOY), p. 1223. — Comparaison entre le courant continu et le courant alternatif (M. MATHIVET), p. 1237.

5e *Section*. — Systèmes français modernes d'horlogerie électrique (M. GOSSELIN), p. 1253.

6e *Section*. — Erreur introduite par les transformateurs dans la mesure d'une puissance et d'une énergie (M. ILIOVICI), p. 1313.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Digitized by Google

Digitized by Google

LA RÉCUPÉRATION JUSQU'A L'ARRÊT DES TRAINS EN COURANT CONTINU

par M. F. Guéry.

Importance de la récupération.

L'importance économique du problème de la récupération des pertes d'énergie au démarrage et au freinage des trains électriques a, depuis longtemps, frappé les esprits. Les chiffres suivants en donnent une idée : cette récupération appliquée aux Chemins de fer Métropolitain et Nord-Sud de Paris, dans les conditions que permettent de réaliser les systèmes actuellement étudiés, procurerait une économie annuelle d'une quarantaine de milliers de tonnes de combustible et, aux prix actuels, de près de dix millions de francs d'énergie électrique.

Des systèmes procédant de principes variés ont été proposés pour résoudre ce problème. Je n'ai pas l'intention d'entreprendre la description détaillée de ces systèmes. Je chercherai surtout à dégager les principes généraux auxquels on peut les rattacher et à faire ressortir les avantages et les inconvénients pratiques qui résultent de l'application de ces principes.

Mon but est donc plus la critique que la description et je m'excuse d'avance de ne pas citer tous les travaux effectués dans l'ordre d'idées considéré. Je serai néanmoins amené à parler de quelques applications qui ont fait époque et que je prendrai à titre d'exemple. J'ajoute que les opinions que je pourrai être amené à émettre sont exclusivement personnelles et basées sur mon expérience générale d'ingénieur électricien, spécialement orientée vers les installations et l'exploitation.

Catégories de pertes à récupérer.

Les pertes d'énergie que l'on peut chercher à récupérer appartiennent à deux catégories : énergie électrique perdue dans les résis-

Digitized by Google

tances de démarrage, énergie mécanique transformée en chaleur par les freins.

Les freins sont employés, soit pour modérer la vitesse dans les pentes, soit pour arrêter les trains : sur les lignes de Chemins de fer interurbaines, où les arrêts sont peu fréquents, l'énergie à récupérer n'a donc une certaine importance que lorsque le profil est très accidenté. Au contraire la récupération est toujours intéressante sur une ligne urbaine à arrêts fréquents.

Toutefois, pour des raisons que la suite de cette étude fera ressortir, la récupération de l'énergie de freinage jusqu'à l'arrêt présente beaucoup plus de difficultés que la restitution de l'énergie mécanique disponible dans les pentes. C'est pourquoi la récupération a été appliquée aux lignes d'intérêt général avant de l'être aux Métropolitains et aux Tramways. J'avais déjà signalé quelques-unes de ces difficultés dans une note parue dans la *Revue Générale de l'Electricité* les 7 et 14 février 1920 faisant suite à deux communications à notre Société [1]. Depuis cette époque j'ai approfondi l'étude de cette question ; c'est ce qui me permet de l'exposer aujourd'hui.

Je commencerai par un examen rapide des deux catégories de pertes indiquées tout à l'heure et des moyens de les récupérer.

Démarrage.

Conditions générales à réaliser.

L'effort que doivent fournir les moteurs est compris dans des limites assez restreintes et, dans tous les cas, il est le plus souvent plus grand au démarrage qu'en pleine marche.

La puissance utile à fournir part donc d'une valeur nulle au début du démarrage pour atteindre sa valeur la plus grande à la fin de celui-ci ou dans certaines conditions de la pleine marche. D'autre part, si les moteurs sont liés aux essieux par une transmission à rapport de réduction fixe, les nécessités de la construction obligeant, pour la bonne utilisation des matériaux, à maintenir l'intensité du courant qui parcourt les enroulements dans des limites assez étroites, il est nécessaire que la tension aux bornes des moteurs varie d'une valeur presque nulle au début du démarrage à une valeur maxima en pleine marche.

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*. Février 1918. Novembre 1919. *Revue générale de l'Electricité*, 7 et 14 février 1920, t. VII, p. 1791-92 et p. 222-240.

Digitized by Google

Système série.

Ces conditions sont presque parfaitement remplies et d'une manière très simple par une distribution à intensité constante. Aussi n'est-il pas surprenant que ce système de distribution ait été proposé pour la traction. Notre Société a entendu, sur ce sujet, en 1909, une communication de notre collègue Bourdel, décédé depuis (1).

Vous savez quel parti d'habiles ingénieurs ont pu tirer de la distribution à intensité constante, mais les inconvénients du système, déjà sensibles à poste fixe, semblent singulièrement graves pour des équipements d'automotrices, en raison, en particulier, de la nécessité de prévoir un très grand isolement par rapport à la terre pour la ligne, les moteurs et les appareils de manœuvre.

Démarrage sur résistances.

L'emploi du système série, qui exigerait la transformation complète du matériel existant, ne semble donc pas devoir beaucoup tenter les exploitants. On doit, par suite, considérer qu'on se trouve toujours en présence de distribution à tension constante.

Pour ramener à zéro la tension aux bornes des moteurs au début du démarrage, le procédé le plus simple est, dans ce cas, d'employer une résistance dont on réduit ensuite progressivement la valeur.

Rapport de réduction variable.

La cause de la perte d'énergie au démarrage est donc l'emploi d'une distribution à tension constante. Comment réduire cette perte ? Reportons-nous aux restrictions que j'ai faites plus haut, lorsque j'ai défini les conditions à remplir au démarrage.

J'ai supposé d'abord les moteurs liés aux essieux par une transmission à rapport de réduction fixe. On pourrait songer à rendre ce rapport de réduction variable, ce qui conduirait au système de démarrage des automobiles. Cette idée n'est peut-être pas à rejeter sans examen dans tous les cas. Elle ne semble pas, toutefois, devoir être appliquée à des équipements de métropolitain. Nous signalons cette possibilité sans nous y arrêter, car elle ne peut, en tous cas, intéresser spécialement des électriciens.

(1) *Bulletin de la Société Française des Électriciens*, 2e série, tome IX. N° 84, p. 233, 7 avril 1909.

Digitized by Google

Couplages variés des moteurs.

J'ai signalé en outre la nécessité de maintenir l'intensité qui parcourt les enroulements dans des limites étroites.

Mais, lorsqu'on dispose de plusieurs moteurs sur le même équipement, on peut réaliser ce desideratum tout en faisant varier l'intensité dans le circuit commun, par des couplages variés de moteurs. C'est le principe bien connu du couplage série parallèle qui donne déjà une économie importante dans le cas de deux moteurs et qui devient tout à fait intéressant pour quatre moteurs, à la condition de mettre ceux-ci tous les quatre en série au début du démarrage. L'expérience a fait justice des craintes des électriciens au sujet des inconvénients possibles de ce couplage en cas de patinage.

Transformateurs et dévolteurs.

On peut enfin chercher à remplacer les résistances par un système absorbant, d'une manière plus économique, la différence de tension entre la ligne et les moteurs. On se souvient du système Ward Leonard, qui jouait ce rôle et qui avait donné lieu entre autres à des essais aujourd'hui entrés dans l'histoire, sur la ligne de Saint-Germain-Ouest à Saint-Germain-Grande-Ceinture, sous la direction de notre ancien Président M. Mazen.

Le système Ward Leonard, très employé dans les applications de l'électricité aux mines et à la métallurgie, s'est présenté sous plusieurs formes.

En dernier lieu, s'il m'en souvient bien, il consistait en un dévolteur en série avec les moteurs renvoyant sur la ligne l'énergie absorbée.

Diviseurs de tension.

Enfin, plus récemment, on a mis au point des dispositifs basés sur le principe bien connu des égalisatrices pour les distributions à plusieurs ponts et qu'on pourrait désigner sous le terme de diviseurs de tension. Ces appareils permettent de graduer la tension aux bornes des moteurs au fur et à mesure du démarrage; combinés avec les couplages de moteurs, ils permettent de disposer d'une échelle serrée de tensions rendant inutile l'emploi des résistances.

Digitized by Google

Faible importance de l'économie à réaliser sur les pertes au démarrage.

On remarquera l'analogie de certains des dispositifs qui précèdent avec celui des sous-volteurs d'artères dans les distributions fixes. Or j'ai eu maintes fois à faire le bilan économique de ces sous-volteurs, et j'ai pu constater que le total des dépenses résultant de l'amortissement supplémentaire qu'ils occasionnent et de leurs pertes d'énergie est en général très voisin des dépenses résultant de l'emploi des résistances qu'ils remplacent. Il en est vraisemblablement de même en traction. De telle sorte que s'il ne s'agissait que de récupérer les pertes au démarrage, il serait, je crois, inutile de compliquer les équipements actuels.

II. — Récupération des pertes au freinage.

La question se présente en général sous un tout autre aspect, en ce qui concerne la deuxième catégorie de pertes récupérables, celles dues à l'énergie transformée en chaleur par les freins.

Deux ordres d'idées différents peuvent être envisagés pour réduire cette perte, suivant que l'on cherche à accumuler sur le train même l'énergie vive libérée au freinage, pour l'utiliser ensuite au démarrage suivant, ou bien que l'on renvoie tout simplement au réseau de distribution, pendant les périodes de freinage, de l'énergie électrique qui est utilisée par d'autres récepteurs branchés sur le même réseau.

Je ne parle pas de l'accumulation électrique sur le train qui est visiblement sans intérêt.

Accumulation mécanique de l'énergie de freinage.

Les différentes tentatives faites dans le premier ordre d'idées n'ont abouti à rien de pratique. Il ne semble pas qu'il existe à l'heure actuelle de système suffisamment simple, léger et de bon rendement, qui permette de réaliser l'accumulation sur le train lui-même de l'énergie de freinage.

On peut se rendre compte aisément de la nature des difficultés rencontrées dans cette voie. L'énergie potentielle dans laquelle doit se transformer l'énergie vive du train, peut être empruntée par exemple à la gravité ou à un organe élastique. Nous nous souvenons d'un essai d'accumulation d'énergie par gravité, auquel un inventeur nous avait conviés il y a une vingtaine d'années. Il suffisait de voir l'appa-

Digitized by Google

reil pour être fixé immédiatement sur les possibilités d'applications pratiques à un métropolitain. D'ailleurs les chiffres donnés plus loin vous édifieront complètement sur ce point.

L'organe élastique auquel on pourrait d'autre part demander l'accumulation de l'énergie libérée au freinage peut être l'air comprimé. Des systèmes basés sur l'emploi de ce fluide, ont été proposés il y a déjà fort longtemps. Il est possible que d'habiles mécaniciens arrivent à rassembler dans le même organe le compresseur et le moteur à air nécessaires à la double transformation d'énergie qu'exige tout problème d'accumulation. Mais, indépendamment du prix élevé des appareils, qui serait vraisemblablement à lui seul un obstacle insurmontable à l'emploi de l'air comprimé pour l'usage considéré, tous ceux qui ont eu à employer des compresseurs savent avec quelles difficultés on parvient à maintenir en exploitation le rendement de ces appareils dans des limites convenables.

Pour montrer par un exemple quantitatif quelle est la nature de la difficulté rencontrée par l'accumulation de l'énergie sous forme d'un organe élastique, je vais indiquer le résultat du calcul de ressorts qui permettraient de faire cette accumulation pour un train de métropolitain de 5 voitures pesant 140 tonnes et commençant à freiner pour l'arrêt à une vitesse de 30 kilomètres à l'heure.

L'énergie vive totale à récupérer a pour valeur :

$$\frac{1}{2}\ \frac{140\,000}{9{,}81}\left(\frac{30\,000}{3\,600}\right)^2 = 500\,000 \text{ kilogrammètres.}$$

Une partie de cette énergie se dissipe en frottement. Mais comme nous avons seulement en vue la détermination d'un ordre de grandeur, nous négligerons cette perte.

Supposons d'abord que nous voulions nous servir de l'air comprimé des freins comme organe élastique et que nous le refoulions sur chaque voiture par un piston se déplaçant dans un cylindre de 500 mm de diamètre intérieur par exemple. Il faudrait admettre naturellement une variation de pression de l'air. Pour simplifier le calcul, nous prendrons une pression moyenne de 6 kg par cm^2. La course du piston devra être de :

$$\frac{500\,000}{5} \times \frac{1}{6 \times \dfrac{3{,}14 \times 50^2}{4}} = 8{,}5 \text{ mètres.}$$

On voit l'importance de l'instrument et celle du réservoir qu'il faudrait avoir en plus pour maintenir la pression dans des limites raisonnables. On peut calculer de même un ressort qui serait consti-

Digitized by Google

tué en empilant des rondelles Belleville. Pour une course utile de 5 m environ, sur chaque voiture, il faudrait un effort de 20 000 kg.

Nous prendrons la rondelle Belleville de 32 000 kg travaillant aux $\frac{2}{3}$ environ de la charge d'écrasement. Cette rondelle a un diamètre de 280 mm et un encombrement total de 21,5 mm à vide dans le sens de la flexion. Elle pèse 7 kg 24.

Sa flèche, sous l'effort de 20 000 kg, est d'environ 3,7 mm. Pour 5 m de course, il faudrait donc 1 350 rondelles, soit un encombrement de 29 mètres dans le sens de la flexion, et un poids de 10 tonnes.

Ces quelques chiffres montrent bien que l'accumulation sous forme élastique de l'énergie de freinage, n'est pratiquement pas réalisable.

Ils permettent également de se rendre compte quantitativement de la difficulté d'accumulation sous forme d'énergie gravifique, que nous avons déjà signalée plus haut. Admettre pour un poids une course verticale de 4 m paraît être la limite du possible dans bien des cas, dans un souterrain de métropolitain. Les 500 000 kilogrammètres à accumuler au freinage d'un train, exigeraient donc l'élévation d'une charge de 125 tonnes. Ce chiffre nous dispense d'insister.

Signalons en passant que l'exemple numérique que nous venons de prendre, contribue à montrer l'intérêt de la récupération en fixant nettement et d'une façon bien tangible l'ordre de grandeur de l'énergie récupérable.

Retour au réseau électrique de l'énergie vive libérée au freinage.

C'est donc au second ordre d'idées indiqué plus haut, c'est-à-dire au retour au réseau électrique de l'énergie libérée au freinage qu'il faut pratiquement recourir. Le problème qui se pose ainsi se rattache tout d'abord à celui que nous avons examiné plus haut, de la réduction des pertes d'énergie au démarrage. On peut en effet observer que la distribution à intensité constante permettrait très simplement la récupération, puisqu'il suffirait d'inverser les connexions des inducteurs par rapport aux induits, pour obtenir des moteurs un effort retardateur réglé automatiquement à une valeur convenable.

Sur une distribution à tension constante, il faudra maintenir, aux bornes des circuits des moteurs, une tension supérieure à celle du réseau pour des vitesses comprises entre celle de pleine marche et l'arrêt. Le problème, qui paraît au premier abord relativement simple, s'il s'agit seulement de maintenir une vitesse normale sur

Digitized by Google

les pentes, se présente immédiatement avec toute sa difficulté pour le freinage jusqu'à l'arrêt. C'est donc bien encore ici la distribution à tension constante qui est l'obstacle à surmonter.

Emploi des moteurs de traction comme génératrices. Variations de l'effort de freinage.

Comme dans le cas du démarrage, les couplages variés de moteurs permettent, dans certains cas, de réduire la difficulté; mais celle-ci subsiste sous une autre forme qui est spéciale à la marche des moteurs de traction en génératrice et que nous allons examiner.

Lorsque l'énergie de freinage est renvoyée au réseau électrique, l'ensemble du train et de ses moteurs constitue un groupe électrogène en parallèle avec ceux qui alimentent ce réseau. Cette mise en parallèle s'effectue, il est vrai, par l'intermédiaire d'une ligne dont la résistance varie avec la position du train. Mais il n'en est pas moins vrai que le train en récupération doit prendre sa part des variations de charge sur le réseau alimenté par les groupes avec lesquels il se trouve ainsi mis en parallèle. L'effort de freinage doit donc subir des variations continuelles. Le problème qui se pose est de maintenir ces variations dans des limites telles qu'elles ne puissent nuire à la conservation du matériel, à la régularité et à la sécurité de l'exploitation et au confort des voyageurs.

Remarquons de suite que les variations de charge dépendant de beaucoup de circonstances, il peut se faire que telle solution donnée à ce problème puisse suffire dans certaines applications et échouer complètement dans d'autres. Il n'y a donc pas de conclusion générale à tirer du succès ou de l'insuccès d'un système dans des applications déterminées. Remarquons également qu'il semble que les lignes métropolitaines réunissent les conditions les plus défavorables à la solution du problème posé. En effet, les arrêts doivent y être très précis, la longueur des quais excédant fort peu celle des trains. D'autre part, en raison du grand nombre des voyageurs debout aux heures d'affluence, des irrégularités dans le freinage donnant lieu à des variations brusques d'accélérations ne pourraient être tolérées.

Enfin, par suite du grand nombre de trains en service, la ligne de traction est relativement de faible résistance et n'exerce qu'un effort régulateur négligeable sur les variations de charge du train en récupération.

Il résulte de ce qui précède, que tout système donnant satisfaction

Digitized by Google

aux exigences d'un métropolitain aura de grandes chances d'être applicable partout, mais qu'il n'est pas impossible que des systèmes inapplicables sur une ligne métropolitaine puissent être employés ailleurs sans inconvénients trop graves.

Choix du mode d'excitation des moteurs fonctionnant en génératrice.

Ayant défini le problème dans son ensemble, il nous reste à faire voir les différents aspects des difficultés qu'il présente. En premier lieu, la mise en parallèle pure et simple de génératrices sur un réseau à tension constante interdit comme on sait, pour cause d'instabilité foncière, l'emploi sur ces machines de l'excitation série. Les moteurs de traction, qui sont très généralement excités en série, ne peuvent donc être employés tels quels pour récupérer. Différents moyens que nous examinerons plus loin avec quelques détails, ont été proposés ou employés pour résoudre ou tourner cette difficulté. Nous examinerons de suite un point de controverse important. Les ingénieurs de traction ont la réputation de tenir au moteur série comme à un dogme intangible. Dans toute industrie, il y a des dogmes de ce genre; on ne s'aventure pas volontiers dans certaines expériences par crainte de perturbations dans l'exploitation qui sont parfois, il faut bien le reconnaître, hors de proportion avec l'importance souvent minime des incidents qui les provoquent.

Les ouvrages classiques de traction électrique indiquent comme avantage du moteur série la grandeur du couple au démarrage, une bonne commutation aux fortes charges et une sorte d'autorégulation de l'effort moteur qui diminue lorsque la vitesse augmente. Cette dernière propriété ne peut être considérée comme un avantage que sur les lignes à arrêts fréquents. Pour la grande traction, le maintien de l'effort en pleine marche est au contraire souvent revendiqué comme nécessaire.

Pour l'exploitant, je crois que le moteur-série a surtout l'avantage de sa robustesse. Peut-être les procédés actuels de construction permettent-ils de fabriquer des moteurs dont les inducteurs soient pourvus d'un fil relativement fin et qui néanmoins résistent bien aux trépidations; mais j'ai vu, il n'y a pas plus de quelques années, des moteurs de tramways d'assez faible puissance avec inducteurs en fil rond, dont les isolants ne résistaient que quelques mois aux secousses qu'ils subissaient.

Il ne sera donc pas facile de persuader aux ingénieurs de traction qu'ils peuvent sans crainte abandonner le moteur-série.

Digitized by Google

C'est une des raisons pour lesquelles, dans beaucoup de systèmes de récupération, on s'est contenté d'adjoindre aux moteurs un dispositif tel qu'excitatrice spéciale ou batterie d'accumulateurs, qui permet de transformer le moteur-série, normalement employé au démarrage, en moteur à caractéristique shunt.

Influence des variations de charge sur les moteurs à caractéristiques shunt.

Dans l'un et l'autre cas, le problème de la stabilité de l'effort résistant est le même. Nous avons montré tout à l'heure comment il se posait d'une manière générale. Nous allons maintenant l'examiner au point de vue de l'emploi du moteur à caractéristique shunt. Nous pouvons, en effet, faire abstraction des variations de charge elles-mêmes et ne tenir compte que des variations de tension qu'elles provoquent aux bornes des moteurs en récupération. Or, sur les réseaux de traction, ces variations sont de l'ordre de 30 à 40 pour cent de la tension normale. Dans ces conditions, il est bien évident qu'une génératrice à excitation purement shunt donnerait lieu à des variations de charge absolument inadmissibles. Par suite, il est indispensable d'adopter pour les moteurs employés à la récupération une caractéristique anti-compound.

En cas de court-circuit sur la ligne, les moteurs shunt ou même anti-compound fonctionnant en génératrices, sont parcourus par un courant d'une intensité considérable. Mais il y a lieu de remarquer qu'en général, cette intensité est limitée, en même temps que le couple résistant auquel elle correspond, par le patinage des roues. Le plus souvent, sur une ligne à adhérence, les inconvénients, tant mécaniques qu'électriques, d'un court-circuit se produisant dans ces conditions ne seront pas très graves. Il n'en est pas de même sur les lignes à crémaillère où, comme nous l'avons déjà signalé (1), le moteur shunt doit être proscrit.

Réalisations d'une caractéristique anti-compound.

Cette caractéristique anti-compound peut être réalisée de différentes manières : si l'on ne craint pas de compliquer les moteurs, on peut monter sur les inducteurs de ceux-ci un enroulement shunt et un en-

(1) *Revue générale de l'Electricité*, 14 février 1920, t. VII, p. 222-240.

Digitized by Google

roulement série, ce dernier agissant pour renforcer l'excitation shunt pendant le démarrage, pour la réduire pendant le freinage récupérateur.

Ce dispositif est assez coûteux, puisqu'il oblige à monter sur l'inducteur des moteurs deux enroulements qui opposent leurs effets.

On peut, pour cette raison, désirer maintenir l'excitation série des moteurs qui, pendant la période de démarrage ou de pleine marche sous courant, offre en outre l'avantage de donner à l'effort moteur une stabilité beaucoup plus grande que l'excitation shunt.

On peut, dans ce cas, réaliser la caractéristique voulue en récupération, au moyen d'une excitatrice spéciale convenablement disposée. Un des dispositifs les plus ingénieux conçus dans cet ordre d'idées est celui appliqué par la Westinghouse Electric C° aux locomotives 10 300 du Chemin de fer Milwaukee St-Pol (1).

Pendant la marche en récupération, les inducteurs des moteurs de traction reçoivent leur courant d'une excitatrice spéciale dont la tension peut être réglée à la main par le mécanicien au moyen d'un rhéostat intercalé dans le circuit d'excitation de cette excitatrice, branché lui-même aux bornes d'une batterie d'accumulateurs. Indépendamment de l'intervention du mécanicien, l'excitatrice fournit donc une tension constante. Cette excitatrice est mise en série avec les inducteurs des moteurs et l'ensemble est mis en dérivation aux bornes d'une résistance S dite *résistance de stabilisation* (figure 2).

Ce qui est vraiment original dans ce système, c'est que les connexions des inducteurs par rapport aux induits restent les mêmes pour la marche en récupération que pour la marche en moteurs. Le sens du courant est inversé dans les inducteurs par l'action de l'excitatrice, ce qui exige que la tension aux bornes de celle-ci soit supérieure à la différence de potentiel aux bornes de la résistance S. On comprend dès lors aisément les raisons de l'efficacité de la résistance S, une tendance à l'augmentation d'intensité dans le circuit des induits provoquant une tendance à la réduction d'intensité dans le circuit des inducteurs.

La stabilisation produite par le système appliqué par la Westinghouse Electric C° est efficace dans tous les cas et il n'y a pas à être surpris que ce système ait donné satisfaction à ce point de vue. (Note annexe n° 1).

---

(1) JAPIOT et FERRAND, *La Traction électrique aux Etats-Unis*. Dunod, 1921.

Digitized by Google

Réglage de la tension en récupération.

On peut donc parvenir, par des procédés relativement simples, à réduire notablement l'importance des variations de l'effort de freinage dues aux variations de charge. Il reste, comme dans le cas du démarrage, à compenser la différence de tension entre la ligne et les moteurs ; les procédés employés dans ce but sont les mêmes que ceux que nous avons indiqués pour le démarrage, c'est-à-dire : transformateurs genre Ward Léonard, diviseurs de tension, couplages variés des moteurs.

Systèmes à intensité constante.

Tous ces dispositifs sont d'une application relativement simple lorsque la commande automatique n'est pas indispensable, comme c'est le cas par exemple pour certaines locomotives sur des lignes d'intérêt général. Pour des automotrices de banlieue ou de métropolitains, avec commande à unités motrices multiples, le réglage automatique de l'effort moteur ou résistant s'impose. Les procédés indiqués plus haut peuvent évidemment permettre, jusqu'à un certain point, ce réglage automatique au moins par crans, mais non sans quelques complications d'appareillage. Aussi a-t-on cherché des dispositifs permettant d'une façon simple et en quelque sorte par leur principe même, ce réglage automatique.

Système « Star ».

Un de ces dispositifs a donné lieu, il y a une quinzaine d'années, à une réalisation qui a eu quelque retentissement. Il a été présenté à notre Société par M. Legouez en 1913 (1) sous le nom de système Star, à la suite de quelques essais effectués sur le réseau du Chemin de fer métropolitain de Paris.

Il consiste, en principe, dans un dispositif spécial d'excitation de la dévoltrice du système Ward Leonard, ayant pour effet de rendre constante l'intensité du courant dans le circuit des moteurs. J'ai signalé plus haut, en insistant particulièrement sur ce fait essentiel, que les difficultés spéciales du problème de la récupération viennent de la distribution à tension constante. Elles seraient supprimées si

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, décembre 1913, tome III, 3e série, n° 30, p. 979.

Digitized by Google

cette distribution était transformée localement, sur la motrice même, en distribution à intensité constante. D'après ce que je viens de dire, c'est bien ce que paraît réaliser le système Star. Toutefois, il semblerait que dans une distribution à intensité constante, les moteurs excités en série dussent convenir pour effectuer la récupération. Or, le système Star exige une excitatrice spéciale ou des moteurs à excitation shunt. Il y a là une anomalie apparente dont il convient de rechercher la cause.

Stabilité électrique.

Ce fait nous conduit à étudier spécialement un des aspects les plus délicats de la question de la récupération, celui de la stabilité électrique d'un groupe de machines. Par stabilité électrique, nous entendons celle qui met en jeu l'énergie potentielle que les circuits peuvent accumuler momentanément sous forme magnétique ou par capacité, cette stabilité étant distincte de celle de la charge, très importante également dans le cas de la récupération et liée, comme nous l'avons indiqué plus haut, aux variations de tension sur le réseau. Le cas typique de l'instabilité électrique est celui de la génératrice série sur une distribution à tension constante. Avant de pousser plus loin l'examen des dispositifs admissibles pour la récupération, il convient de rappeler les principes théoriques sur lesquels on peut baser l'étude de la stabilité électrique.

L'expression de la loi de l'induction électromagnétique dans un circuit est une équation différentielle linéaire du premier ordre par rapport aux intensités. Quand plusieurs circuits sont intéressés simultanément aux circulations de courants envisagées, on a donc autant d'équations différentielles simultanées que de circuits. On sait que, dans ces conditions, les intensités ou les différences de potentiel dans les différents circuits s'expriment en fonction du temps par une somme d'exponentielles. Les coefficients exponentiels se déduisent d'une relation de condition représentée par une équation d'un degré au plus égal au nombre de circuits, et dont ils sont les racines. Suivant que les coefficients exponentiels seront positifs, imaginaires ou négatifs, le régime de variation d'intensité correspondant aura les caractères suivants :

Si l'un des coefficients exponentiels est positif, l'intensité croît indéfiniment avec le temps ; c'est *l'instabilité complète*.

Digitized by Google

S'il n'y a pas de coefficient positif et si deux des coefficients sont imaginaires, ces imaginaires sont conjugués, comme on sait ; dans ce cas, le groupe d'exponentielles correspondant se transforme en une fonction périodique du temps. Trois cas sont encore à distinguer :

Le plus souvent, l'imaginaire sera de la forme générale $a+b\sqrt{-1}$. Dans ce cas la fonction du temps correspondante est le produit d'une exponentielle par une fonction sinusoïdale. Si le coefficient de l'exponentielle est positif ($a > 0$), l'intensité croît indéfiniment avec le temps en effectuant des oscillations d'amplitude croissante. C'est également *l'instabilité* complète, sous une forme différente de celle du cas précédent, mais avec un résultat pratique identique.

Si le coefficient exponentiel se présente sous la forme d'une imaginaire pure ($a = 0$), la fonction du temps est purement sinusoïdale; il s'établit un *régime stable*, mais *alternatif*.

Si a est négatif, l'intensité tend vers un régime stable et continu après une série d'oscillations. Nous avons la *stabilité après oscillations*.

Enfin, lorsque tous les coefficients exponentiels sont négatifs, l'intensité tend sans oscillations vers un régime continu. C'est la *stabilité complète*.

L'application de ces principes à des machines est assez délicate, parce que la saturation magnétique empêche de considérer comme constants des coefficients qui doivent l'être pour que les équations aient la forme simple qui en permet la solution. Les résultats obtenus en supposant les coefficients constants doivent donc être considérés comme approchés et capables d'indiquer seulement le sens général des phénomènes. Même avec ces restrictions, il est parfois difficile de déterminer dans quelles limites un ensemble de machines est stable ou non, les coefficients pouvant avoir une expression compliquée en fonction des données.

Nous avons néanmoins effectué cette étude dans certains cas, et elle nous a donné des résultats qui nous ont paru d'accord avec la pratique. Nous avons pu vérifier ainsi en particulier que le système Star n'est pas stable électriquement si les moteurs sont employés avec leur excitation série pour la récupération (Note Annexe II).

Stabilité de la charge.

L'emploi de moteurs à caractéristiques shunt conduit, comme nous l'avons vu, à des difficultés au point de vue de la stabilité de la charge. Ces difficultés et d'autres que nous exposerons dans la note annexe II

Digitized by Google

ont conduit à compliquer notablement la première réalisation du système Star. Des perfectionnements ingénieux et décelant une connaissance approfondie de la question de la part de leurs auteurs ont été revendiqués en sa faveur (1). Nous en ignorons les résultats pratiques.

Stabilité mécanique.

Il faut enfin tenir compte, lorsqu'on étudie des groupements de machines s'écartant des couplages usuels et munis d'excitations plus ou moins complexes, d'une autre sorte de stabilité, celle de la vitesse, qu'on pourrait qualifier de stabilité mécanique. Il peut se faire en effet que des variations d'intensité soient amplifiées par des variations de vitesse qui en soient corrélatives. Ce cas paraît se présenter également dans le système Star du début. Il peut même arriver que cette instabilité mécanique se manifeste par des oscillations pendulaires; M. Janet a signalé un cas de ce genre il y a quelques années. Ces cas d'instabilité se produisent naturellement de préférence lorsque les machines en cause travaillent sans couple moteur, sans entraîner de masses importantes, comme c'est le cas pour les survolteurs.

Nous avons insisté particulièrement sur les différents cas d'instabilité que l'on peut rencontrer dans l'étude d'un système de récupération. Nous pensons en effet que les combinaisons plus ou moins compliquées d'enroulements de machines, auxquelles les conditions imposées à un pareil système peuvent conduire, sont la source de phénomènes d'oscillation auxquels il est utile de penser.

Dispositif Boucherot.

En partant du principe indiqué plus haut de la transformation locale de la distribution à tension constante en distribution à intensité constante, on peut s'affranchir de la nécessité de l'excitatrice et employer le moteur série tel quel pour récupérer.

M. Boucherot a indiqué, dès 1898, le principe d'un dispositif permettant d'obtenir ce résultat (2).

M. Boucherot avait été frappé du fait que les relations de proportion entre les forces électromotrices et les intensités, avaient la même forme respectivement en courant alternatif pour les valeurs

(1) *Brevets français*, nos 523, 431 et 529.206 du 22 juillet 1920.
(2) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, février 1904.

Digitized by Google

efficaces de ces grandeurs dans une inductance et une capacité et, en courant continu, pour les forces électromotrices et les intensités d'une dynamo excitée en série avec excitation négative ou positive, l'excitation positive jouant le rôle d'une résistance négative. M. Boucherot avait imaginé précédemment des schémas de circuits comprenant inductances, capacités et résistances et permettant de faire passer dans la résistance un courant efficace constant quand on mettait l'ensemble du circuit sous différence de potentiel constante. L'analogie signalée plus haut lui a permis d'établir les schémas de circuit à courant continu comprenant des dynamos excitées en série et un circuit d'utilisation à intensité constante lorsque l'ensemble du circuit est branché sur un réseau à tension constante.

M. Boucherot avait poussé assez loin l'étude de ces dispositifs en cherchant en particulier les conditions d'économie maxima et un essai avait été fait à la Maison Bréguet; M. Boucherot doit donc bien être considéré comme un précurseur du système Star ou de tous autres systèmes basés sur le principe de l'intensité constante. Ce qui est remarquable, c'est que le dispositif Boucherot semble pouvoir échapper à l'écueil d'instabilité qui oblige à compliquer le système Star (Note annexe III).

Dispositif Pestarini.

Plus récemment, un dispositif paraissant avoir les mêmes qualités que le système Boucherot, mais avec, en plus, l'avantage d'une plus grande simplicité, a été imaginé par M. Pestarini (1). Il consiste, en principe, dans un induit de dynamo à courant continu tournant dans une couronne de fer servant simplement à fermer les lignes de force du champ d'induit. Sur le collecteur de cet induit sont montées des lignes de balais à 90°. On démontre aisément que cette machine étant entraînée à vitesse constante par un moteur qui a simplement à fournir les pertes, lorsqu'une des lignes de balais est reliée à une distribution à tension constante, on recueille un courant d'intensité constante, dans un circuit relié à l'autre ligne de balais. Ce système, comme celui de M. Boucherot, permet l'emploi de moteurs série pour la récupération.

On pouvait craindre seulement des difficultés de commutation. Il semble que ces difficultés aient été évitées par les dispositifs spéciaux employés par M. Pestarini.

(1) *Brevet français*, n° 547 855 du 25 février 1922.

Digitized by Google

Stabilité des moteurs série employés en récupération.

L'emploi des moteurs série pour freiner conduit à envisager certains problèmes de stabilité qui ne se posent pas avec les moteurs shunt. Aucune difficulté de ce genre ne se présente dans les couplages en série. C'est le couplage en parallèle qui est délicat. On sait que ce couplage ne peut se faire qu'en mettant séparément en parallèle les inducteurs et les induits. Ce montage paraît stable électriquement au sens que nous avons défini plus haut. Mais il donne lieu à des difficultés d'amorçage bien connues des ingénieurs de traction qui ont eu à en subir les inconvénients dans l'emploi du freinage rhéostatique. Ces difficultés ont été étudiées tout spécialement, il y a quelques années, par M. Schopfer, Ingénieur aux Tramways de Nice (1). Aucune théorie actuelle ne me paraît expliquer correctement ces anomalies d'amorçage. J'ai étudié la question à fond, mais la théorie à laquelle je suis parvenu et qui doit toucher la vérité d'assez près ne m'a pas paru finalement suffisamment convaincante pour que je croie devoir la publier. Fort heureusement, nous sommes dans un cas où il n'est pas absolument indispensable de connaître la cause pour remédier au mal. La solution du croisement des inducteurs dans les équipements de tramways à deux moteurs est maintenant classique et donne lieu pratiquement à des amorçages très corrects. Dans une note à l'Académie des Sciences (2), j'ai indiqué la théorie de la stabilité de ce montage étendu à plus de deux moteurs et dénommé montage en zig-zag. J'ai complété les indications de cette note dans une autre note publiée dans l'Industrie des Tramways et Chemins de fer (3).

Enfin j'ai indiqué, il y a quelques années, une solution qui permet dans tous les cas l'emploi du montage habituel et qui consiste à intercaler dans le circuit des induits un enroulement en série muni de quelques spires seulement et de sens tel qu'il ait un effet démagnétisant quand il est parcouru par le courant de récupération (4).

On peut donc considérer le problème du couplage des moteurs série pour la récupération comme entièrement résolu et aucun obstacle ne peut se présenter sur ce point à l'emploi de ce type de moteurs.

---

(1) *Industrie des Tramways et Chemins de fer*, n° 189 septembre 1922, p. 191.
(2) *C. R. de l'Académie des Sciences*, 19 juin 1922, LCLXXIV, p. 1620 à 1623.
(3) *Industrie des Tramways et Chemins de fer*, n° 194, février 1923, p. 54-55-56.
(4) *Brevet français*, n° 558.205 du 2 novembre 1922.

Digitized by Google

Stabilité de charge dans les systèmes à intensité constante.

Il nous reste à voir comment les dispositifs Boucherot et Pestarini se comportent en cas de variations de tension. Dans ces deux dispositifs, si la vitesse du moteur d'entraînement est maintenue constante, le courant dans le circuit des moteurs varie proportionnellement à la tension de distribution. Il paraît difficile d'exiger davantage, et il semble que l'on puisse obtenir ainsi une stabilité de charge au moins aussi bonne, sinon meilleure, que celle résultant de systèmes perfectionnés d'anticompoundage.

Nécessité de l'inverseur dans la récupération par moteurs série.

On a parfois voulu considérer comme un avantage du moteur shunt sur le moteur série le fait que le moteur shunt fonctionne indifféremment en moteur ou en génératrice sur un réseau déterminé, sans croisement de connexions.

Nous ne pensons pas qu'une telle propriété puisse être considérée comme un avantage sérieux en traction. En effet, la stabilité de l'effort est le but principal à rechercher dans ce cas : la volonté du machiniste doit intervenir pour déterminer le sens de cet effort et son ordre de grandeur. C'est un point sur lequel l'automatisme ne saurait prévaloir, du moins dans l'état actuel de la technique. Il importe donc peu d'avoir à manœuvrer un inverseur pour passer d'un régime à l'autre.

III. — Particularités de fonctionnement des systèmes de récupération.

Nous avons indiqué dans ce qui précède les principes généraux des systèmes qui peuvent être employés pour la récupération. Avant de passer à l'examen de la question au point de vue économique, il nous reste à indiquer quelques particularités de fonctionnement qu'il est désirable d'obtenir des systèmes à employer sur les Métropolitains et Tramways.

Régulation automatique de la puissance.

La simplicité de construction qui s'impose pour un équipement de tramways ou de métropolitain, ne doit pas nuire à la simplicité et à la sécurité de la conduite des voitures qui constitue une nécessité primordiale pour ce genre d'équipement. En raison des arrêts fréquents et, pour les tramways, des incidents de route imprévus, il

Digitized by Google

est nécessaire en effet, que le conducteur ait uniquement à se préoccuper de la conduite proprement dite du véhicule et non du fonctionnement des appareils, et qu'il ait sous la main des commandes simples, correspondant aux circonstances les plus urgentes qui peuvent se présenter en cours de route et agencées de manière à obéir à quelques mouvements réflexes répondant à ces circonstances.

Dans beaucoup d'équipements comportant l'emploi de la récupération, l'amorçage de cette récupération et son réglage ultérieur sont des opérations délicates qui demandent une surveillance attentive. Ce n'est pas là un des moindres obstacles qui se soient opposés à l'emploi de la récupération dans les équipements d'automotrices.

Mais le maintien d'une intensité constante dans les moteurs pourrait modifier, dans un sens peu avantageux pour des équipements de tramways ou de métropolitains, les conditions habituelles d'emploi de moteurs à caractéristiques série sur une distribution à potentiel constant. En effet, dans ces conditions, une fois passée la période de démarrage, l'intensité et le couple des moteurs tendent à se réduire quand la vitesse augmente et, par contre, si l'effort de traction demandé à l'automotrice s'accroît par suite des circonstances de tracé, de profil et de trafic, le couple moteur tend de lui-même à augmenter en même temps que la vitesse baisse, de telle sorte que la puissance ne s'accroît pas avec l'augmentation d'effort dans les proportions où elle le ferait si l'on employait des moteurs à caractéristique shunt. Cette autorégulation approximative est précieuse pour des équipements de tramways ou de métropolitains. Elle n'est pas à recommander en elle-même pour les équipements de locomotives de Chemins de Fer. Il est nécessaire, en effet, pour ces derniers équipements, de pouvoir maintenir au besoin la vitesse, même lorsque l'effort de traction atteint une valeur élevée. C'est là un des avantages qui ont été souvent revendiqués en particulier en faveur du système triphasé.

Il pourra donc être utile de chercher à amender les dispositifs à intensité constante, pour leur permettre de donner au démarrage des caractéristiques analogues à celles du moteur série sur distribution à tension constante.

IV. — Distinction entre le freinage pour l'arrêt et le freinage en pente.

Dans ce qui précède, nous nous sommes surtout occupés du freinage en vue de l'arrêt, le plus important, en général, pour les métropolitains

Digitized by Google

et les tramways. Toutefois, certaines lignes de tramways en particulier présentent de longues pentes pour lesquelles le freinage récupérateur serait très intéressant. Ce cas comporte nécessairement une complication plus grande que celui du freinage en vue de l'arrêt envisagé seul. En effet, le freinage récupérateur en pente n'a d'intérêt que s'il permet la descente de la pente à vitesse constante. Cette condition est incompatible avec celles qu'exigent le freinage en vue de l'arrêt. En effet, dans ce dernier cas, il faut que l'intensité du courant de freinage n'ait pas tendance à diminuer au fur et à mesure que la vitesse diminue. Il en résulte que, si la vitesse s'accroît, ce qui serait le cas pour un effort de freinage insuffisant en pente, le réglage fait pour le freinage en vue de l'arrêt serait tel que l'intensité n'aurait pas tendance à augmenter, d'où accélération continue sur la pente.

Caractéristique de l'effort de freinage en fonction de la vitesse.

Il est utile d'insister sur cette question de la caractéristique de l'effort de freinage en fonction de la vitesse. Cette caractéristique peut avoir une des trois formes générales a, b, c, représentées par la figure 1. La forme a correspond à un effort de freinage constant ; la forme b à un effort de freinage décroissant quand la vitesse augmente, c'est celle que nous avons indiquée comme devant convenir au freinage en vue de l'arrêt ; enfin la forme c correspond à un effort de freinage croissant avec la vitesse et est celle qui convient pour le freinage sur les pentes.

Nous avons représenté sur la même figure, pour chacun de ces cas, la caractéristique de l'effort moteur dû à une pente déterminée et qui est une ligne horizontale. Les différences d'ordonnées des deux caractéristiques sont proportionnelles à l'accélération que prend le train. On voit que, dans le cas a, il n'y a équilibre pour aucune vitesse. Suivant les valeurs respectives de l'effort de freinage et de l'effort moteur dû à la pente, le train s'arrête plus ou moins vite ou sa vitesse croît au delà de toute limite.

Dans le cas b, il y a équilibre entre les deux efforts pour une valeur donnée de la vitesse. Mais on voit facilement que cet équilibre est instable. Il faut alors que les deux caractéristiques se coupent dans une région que l'on n'atteint pas pratiquement, c'est-à-dire que l'effort de freinage aux plus grandes vitesses réalisables soit supérieur à l'effort moteur de la plus grande pente de la ligne. Ces conditions sont le plus souvent conciliables sur un métropolitain où les arrêts

Digitized by Google

sont rapprochés. Pour une ligne de tramways suburbains, par exemple, le conducteur pourrait se trouver entraîné à dépasser la vitesse limite et, dans ce cas, il ne serait plus maître de son train.

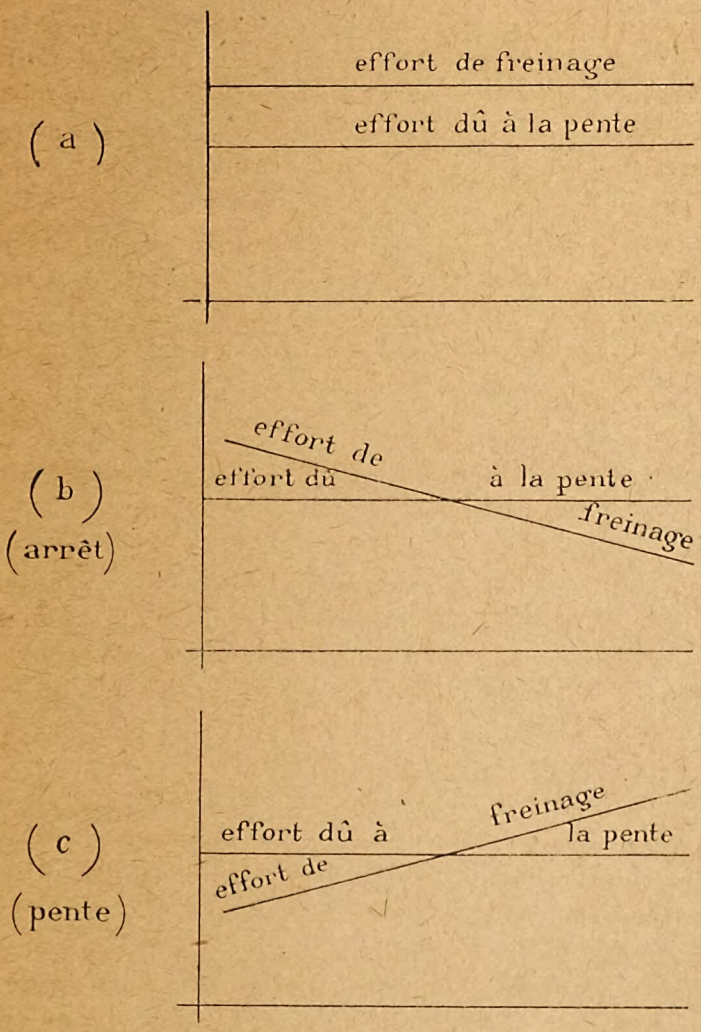


Fig. 1. — Caractéristique de l'effort de freinage.

Il faudra donc examiner de très près les circonstances particulières de chaque ligne avant de fixer les caractéristiques de freinage.

Enfin, dans le cas *c*, le point de rencontre des caractéristiques correspond à un équilibre stable ; on pourra donc retenir le train sur une pente, mais non l'arrêter.

L'incompatibilité entre les conditions du freinage pour l'arrêt et

Digitized by Google

celle du freinage en pente introduit une complication dans les conditions du freinage récupérateur appliqué aux équipements de tramways et de métropolitains. Elle n'est pas à considérer pour un équipement de locomotive pour chemin de fer. En effet, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, la diversité des conditions de trafic auxquelles doit satisfaire une locomotive de chemin de fer oblige à laisser au mécanicien la possibilité de graduer le freinage entre des limites très étendues.

Moyen d'obtenir des caractéristiques de démarrage et de freinage différentes dans un système à intensité constante.

Il résulte de ce qui précède que, dans un système à intensité constante où l'on recherche une certaine automaticité, il sera nécessaire d'obtenir trois caractéristiques différentes correspondant, l'une au démarrage, l'autre au freinage en pente, la dernière au freinage en vue de l'arrêt. Il faudra donc trouver un moyen de faire varier l'intensité que le système maintient automatiquement constante. Cette variation peut être obtenue par différents moyens : l'un d'eux, que j'ai indiqué il y a quelques années (1), est la variation de la vitesse du moteur d'entraînement du groupe régulateur, variation qui peut être obtenue, soit à la volonté du machiniste, soit automatiquement en fonction, par exemple, de l'intensité dans le circuit des moteurs et suivant la caractéristique voulue.

V. — Emploi de l'énergie récupérée.

L'emploi de la récupération en traction exige, en général, certaines précautions en vue du cas où les appareils d'utilisation sur le réseau sont insuffisants pour absorber l'énergie récupérée. En général, sur un réseau de tramways ou de métropolitain aux heures de plein service, les trains en démarrage pourront presque toujours absorber l'énergie des trains en récupération. Toutefois, il n'est pas impossible qu'à certains moments, la puissance récupérée dépasse la puissance demandée. Plusieurs cas peuvent alors se présenter :

Si la ligne alimentée est seule sur une station centrale unique, cas assez rare aujourd'hui, il faudra disposer des appareils d'utilisation spéciaux capables d'absorber ou d'accumuler l'énergie récupérée non

(1) *Brevets français*, nos 564.254 du 23 mars 1923 et 572 299 du 24 septembre 1923.

Digitized by Google

utilisée pour la traction. Cette solution a été employée en Italie sous forme de résistances spéciales et de groupes tampons à volant.

Le plus souvent aujourd'hui, les réseaux de traction sont alimentés par des réseaux généraux de distribution. L'énergie est transformée dans des sous-stations. Si les appareils de transformation sont réversibles, ce qui est le cas pour les commutatrices, l'énergie récupérée en surplus fera retour au réseau général qui pourra le plus souvent l'absorber complètement, les machines génératrices étant seulement soulagées d'une partie de la puissance qu'elles ont à fournir. Ceci suppose que la Compagnie de distribution admette ce retour de puissance. Je ne vois d'ailleurs rien qui s'oppose à ce qu'elle l'admette, si les dispositions pour le comptage et la sécurité sont prévues en conséquence, ce qui est facilement réalisable. On se trouve ici en présence d'un cas de mise en parallèle, sur un réseau général, d'appareils producteurs d'énergie répartis en des points quelconques du réseau, comme il s'en présente beaucoup à l'heure actuelle. Il y a toutefois une particularité dans le cas de la récupération, c'est que la puissance fournie par les trains en freinage ne peut pas être réglée en fonction de la demande de puissance comme celle d'un générateur quelconque. L'adoption généralisée de la récupération sur un réseau de traction, change donc complètement les conditions de fourniture d'énergie qui lui est faite par le distributeur et exige une entente spéciale avec celui-ci pour la limitation éventuelle de la puissance renvoyée au réseau suivant les conditions de fonctionnement de ce dernier. Je répète que le problème ne paraît pas présenter de difficultés insurmontables et je suis convaincu que les distributeurs d'énergie se prêteront à sa solution en raison de l'intérêt général qu'il présente et aussi, dans certains cas, de leur intérêt particulier, comme je l'indiquerai plus loin.

Reste le cas où les appareils de transformations ne sont pas réversibles; c'est celui des redresseurs à vapeur de mercure, entre autres, dont les applications commencent à se développer rapidement en raison de leurs avantages économiques et de la simplicité de leur mise en route. Dans ce cas, il sera évidemment nécessaire de prévoir, dans chaque sous-station, des dispositifs tels que l'énergie récupérée trouve toujours son emploi.

VI. — Aspects divers de la question économique.

La question essentielle, quand il s'agit de récupération, paraît être la question économique; ce qui précède montre, toutefois, qu'elle n'est pas la seule et peut-être même pas la plus importante de celles

Digitized by Google

qui se posent à l'ingénieur de traction. On peut, en effet, l'envisager à deux points de vue différents; ou bien il s'agit d'établir une exploitation nouvelle; il n'y a peut-être pas alors de grandes difficultés à faire adopter un système procurant de notables économies d'exploitation, malgré un prix élevé de premier établissement; ou bien il s'agit de remplacer des équipements existants par d'autres plus économiques; le bilan de l'opération demande alors à être établi de très près. C'est évidemment la deuxième alternative qui intéresse le plus grand nombre d'ingénieurs de traction.

Détermination de l'énergie consommée.

La première question qui se pose est celle de la détermination aussi exacte que possible de l'énergie consommée avec un système déterminé. Pour une ligne nouvelle, la comparaison entre plusieurs systèmes est difficile et manque de bases : en effet, la consommation d'énergie avec un système déterminé peut varier dans de très grandes proportions d'une ligne à l'autre, dans des conditions d'exploitation en apparence identiques. Pour le calcul de l'énergie mécanique en l'absence de récupération, j'ai eu l'occasion de vérifier qu'entre certaines lignes des réseaux métropolitains de Paris et la moyenne des autres, il y a un écart de 25 pour cent au minimum dans l'énergie consommée. J'expose en outre dans la note annexe n° IV, les raisons de l'incertitude dans la consommation sur une ligne déterminée, quand on n'emploie pas la récupération.

Dans le même ordre d'idées, on peut se reporter également à des statistiques qui ont été publiées autrefois sur les consommations spécifiques sur différentes lignes de tramways; on trouve des écarts du simple au double entre ces consommations. Une étude serrée dont je parlerai tout à l'heure, montre que la récupération, sur une ligne métropolitaine peut, à tout le moins, procurer une économie de l'ordre de 20 pour cent. On voit donc que, pour une ligne nouvelle, on peut faire des erreurs d'appréciation telles, que la détermination préalable de la consommation avec tel ou tel système échappe à tout contrôle.

Il n'en est pas de même sur une ligne en exploitation où, sous la réserve expresse de rendre toutes les conditions de marche parfaitement comparables, on peut très exactement déterminer l'économie réalisée par un système par rapport à un autre. J'ai eu dans certaines circonstances, entre autres pour l'application du contrôle par le champ à des

Digitized by Google

équipements existants, à faire cette détermination. En opérant sur une période de temps suffisamment longue, j'ai très bien pu enregistrer une économie de l'ordre de 5 pour cent.

Calcul de l'énergie consommée en l'absence de récupération.

Avant d'opérer par expérience, il est indispensable de se rendre compte, par un calcul préalable, de l'intérêt économique d'un système et, par suite, de faire une détermination exacte de la consommation d'énergie qu'il entraîne.

J'ai exposé, dans une communication de novembre 1919 à notre Société, une méthode qui permet de déterminer assez simplement l'énergie consommée dans le cas des systèmes usuels sans aucune récupération d'énergie. Je crois utile de rappeler cette méthode et de préciser quelques points de son application, pour bien montrer les difficultés réelles de la prédétermination de l'énergie consommée sur une ligne métropolitaine.

Cette étude, qui fait l'objet de la note annexe n° IV, fait ressortir la possibilité de grandes variations de l'énergie consommée, lorsque la récupération n'est pas employée.

Calcul de l'énergie consommée quand on emploie la récupération.

Lorsque la récupération est employée, le calcul de la consommation d'énergie doit être mené un peu différemment. Aux pertes dans les résistances au démarrage, se substituent les pertes dans les appareils servant à la régulation du courant pendant toutes les périodes où ces appareils sont en marche. La consommation d'énergie sous forme d'énergie vive non récupérée est supprimée. Mais les pertes dans les moteurs sont augmentées, par suite du fonctionnement de ceux-ci pendant les périodes de récupération. On voit donc qu'un élément important dans l'évaluation de l'énergie consommée est la perte dans les appareils de régulation. La puissance d'un appareil électrique, tant au point de vue de son prix de revient qu'à celui des pertes qu'il entraîne, pouvant être définie par le produit de la tension qu'il peut normalement engendrer ou supporter en moyenne, par l'intensité moyenne du courant qui peut normalement le parcourir, on voit qu'il y a intérêt à réduire cette puissance au minimum. C'est un des points les plus importants à envisager dans l'étude d'un système de récupération.

Par exemple, dans le système Ward-Léonard, sous sa forme initiale,

Digitized by Google

avec transformation intégrale de l'énergie, la puissance du groupe de transformation pouvait être considérée comme le double environ de celle de l'ensemble des moteurs qu'il alimentait. Il en est sensiblement de même dans le cas d'un dévolteur en série avec les moteurs, qui est celui du système Star par exemple.

Avec un diviseur de tension, on réduit notablement la puissance des appareils régulateurs, qui paraît pouvoir devenir inférieure à celle des moteurs alimentés. On peut parvenir au même résultat avec des dispositifs à intensité constante du genre de celui de M. Boucherot.

Dans l'évaluation des pertes, il faut tenir compte de ce que, dans un service de tramway ou de métropolitain, le groupe régulateur doit être maintenu continuellement en service. Les pertes à vide interviennent donc pendant les périodes d'arrêt et de course sur l'erre et jouent un rôle important dans le bilan économique de tous les systèmes. L'emploi de la récupération conduira également, en général, à un accroissement du poids des équipements, donnant lieu à un accroissement proportionnel de la consommation d'énergie dont il faudra tenir compte.

Economie réalisable.

Pour mettre en lumière l'importance des pertes électriques dans la récupération, je vais indiquer les chiffres résultant d'un projet d'application à une ligne métropolitaine d'un système où le groupe régulateur a une puissance de l'ordre de celle des moteurs.

En appelant 1,00 l'énergie mécanique consommée dans le système usuel avec démarrage série parallèle sur résistances, la récupération, en utilisant l'énergie vive précédemment perdue, réduit cette consommation à 0,53. Mais les pertes dans les moteurs et les résistances sont environ 0,28 dans le système usuel, alors que les pertes dans les régulateurs et moteurs deviennent 0,49 dans le système à récupération. Au total, l'énergie électrique consommée est 1,28 dans le premier cas et 1,02 dans le second, soit une économie pour la récupération de :

$$\frac{1,28 - 1,02}{1,28} = 20\ \%.$$

Cet exemple montre l'importance des pertes électriques dans les systèmes à récupération, et confirme une fois de plus ce que j'ai rappelé au début sur le peu d'intérêt qu'il y a à remplacer le démarrage par résistances par un démarrage par dévolteur. Toute l'économie est dans l'énergie récupérée au freinage, que les systèmes de récupération gaspillent, avec heureusement un certain gain final.

Digitized by Google

Lorsqu'on fait le bilan économique du remplacement du système usuel par un système à récupération, il faut mettre en face du gain d'énergie réalisé, l'amortissement du matériel de remplacement; soit :

D la dépense supplémentaire à faire pour transformer l'équipement d'un train en vue de la récupération;

α le taux d'intérêt et d'amortissement;

η la fraction de l'énergie économisée;

M la masse du train;

ξ la consommation spécifique en watt-heures par tonne-kilométrique;

K le nombre annuel de kilomètres parcourus;

τ le prix du kWh.

En supposant les dépenses d'entretien égales dans les deux cas, la transformation sera avantageuse à la condition :

$$\alpha D \leqslant \frac{\eta \xi \pi M K}{1\,000},$$

α dépend de la durée admise pour l'équipement. Cette durée peut être assez longue. Il n'est en tous cas pas exagéré d'admettre une quinzaine d'années. Au taux actuel d'intérêt, on peut donc prendre pour α une valeur inférieure à 0,12. En admettant pour η une valeur de l'ordre de 20 pour cent à 30 pour cent et en prenant pour les autres coefficients des chiffres normaux pour des lignes métropolitaines, on déduit, de l'inégalité ci-dessus, que la dépense d'installation doit être inférieure à quatre ou cinq fois le nombre de kilomètres annuels parcourus par une rame. Ce dernier chiffre étant de l'ordre de 60 000, on voit que la dépense de transformation ne doit pas dépasser, pour un train, 240 000 fr à 300 000 fr. Ce chiffre est la limite pour laquelle l'opération ne laisse aucun bénéfice. Pour qu'elle soit vraiment avantageuse et séduisante, il faut arriver à réduire la dépense de moitié environ. On sera donc à peu près certain d'obtenir un résultat financier intéressant, si la dépense de transformation d'un train ne dépasse pas 150 000 francs.

Il est difficile à l'heure actuelle de chiffrer cette dépense; on peut toutefois faire à ce sujet les remarques suivantes :

Dans le cas d'une transformation complète de la nature du courant, comme c'est le cas pour les systèmes genre Ward Léonard, Star ou à intensité constante, il y a une simplification certaine de l'appareillage par rapport au système usuel à contacteurs; mais la fourniture d'un appareil de régulation d'une puissance équivalente à celle des moteurs comporte une dépense importante et une augmentation notable du poids de l'équipement. Si l'on peut employer les moteurs série pour

Digitized by Google

freiner, il n'y a pas d'autre appareil essentiel à prévoir, mais il faut que l'inverseur de marche soit prévu pour un fonctionnement extrêmement fréquent, alors qu'il ne fonctionne que très rarement dans les équipements actuels.

Une question délicate est celle du renforcement des moteurs. S'ils sont déjà à leur limite d'échauffement dans un équipement normal, ils ne peuvent assurer le service de la récupération. Si l'échauffement n'est pas à sa limite ou si une ventilation plus parfaite peut être établie, il y a une étude parfois délicate à faire des nouvelles conditions de fonctionnement. En regard des dépenses qu'il pourra y avoir lieu de faire pour adapter les moteurs à un service plus chargé, il conviendra d'ailleurs de tenir compte d'économies d'entretien sur les appareils de freinage normaux qui travailleront très peu lorsqu'on fera usage de la récupération.

Lorsque la caractéristique shunt ou anticompound des moteurs doit être maintenue, l'automaticité du réglage de l'intensité peut exiger des dispositifs assez délicats et un appareillage qui semble devoir être au moins aussi compliqué que celui des équipements usuels. De plus, il faut prévoir, ou bien une excitatrice spéciale, ou bien une modification importante de l'enroulement des inducteurs des moteurs. Dans ce dernier cas, il semble difficile que le poids et l'encombrement de ceux-ci et par suite leur prix, ne se trouvent pas notablement accrus.

VII. — Conditions que doit remplir un système nouveau en exploitation.

Avant de conclure, il reste à examiner quelle peut être l'attitude des exploitants en présence des modifications exigées par l'emploi d'un système entièrement nouveau. L'exploitant, surtout depuis quelques années, ne se présente pas en général, sous forme d'une personne morale unique; par le jeu des conventions entre concédants et concessionnaires, il comprend en général des services qui peuvent appartenir à des Administrations distinctes; il faut donc donner satisfaction séparément à ces services sans espoir que l'un d'entre eux puisse faire prévaloir son avis. Ce résultat n'est pas toujours facile à atteindre. Sans préciser leurs attaches particulières, on peut classer les différents services intéressés sous les rubriques suivantes : service financier, service de gestion, service du mouvement, service de l'entretien, service du contrôle.

Examinons rapidement quelles peuvent être les exigences de chacun de ces services :

Digitized by Google

Le service financier exigera que l'opération de remplacement d'un équipement couvre ses frais dans un nombre d'années raisonnable, et en réalisant finalement une économie par rapport à l'équipement remplacé. Il ne paraît pas impossible d'atteindre ce résultat, mais il y aura toujours à faire accepter une première mise de fonds assez importante en elle-même, bien que représentant par exemple un faible pourcentage des dépenses de premier établissement d'un métropolitain.

Dans les conditions qui viennent d'être indiquées, le service de gestion semblerait devoir donner son adhésion immédiate, son rôle étant de réaliser une exploitation aussi économique que possible; j'ai l'impression que ce sera toujours ce service qui sera le plus intéressé par une question de ce genre.

Le service du mouvement, qui a la charge de l'éducation du personnel de conduite et la responsabilité de la sécurité et de la régularité de la marche des trains, redoute *a priori* toute innovation qui peut apporter un changement dans les manœuvres de mise en marche, de réglage de la vitesse et d'arrêt. Cette préoccupation est légitime et les constructeurs doivent en tenir compte dans la mesure du possible. Il est bien évident, toutefois, que la manœuvre du freinage récupérateur est en elle-même une innovation essentielle et que, sur ce point, le service du mouvement devra adapter ses habitudes aux conditions nouvelles. En particulier, si l'on ne veut pas renforcer les moteurs dans des proportions considérables, et surtout quand on cherche à utiliser les moteurs existants, l'effort de freinage que l'on peut réaliser en récupération est notablement inférieur à celui que les freins à frottement permettent d'atteindre. Il faut donc commencer le freinage plus tôt; on regagnera en général aisément le temps ainsi perdu en maintenant plus longtemps l'effort accélérateur au démarrage pour atteindre une vitesse de pleine marche plus élevée. Ces conditions de marche qui, avec un équipement sans récupération, conduiraient à un accroissement notable de la consommation d'énergie, sont réalisables sans dépenses supplémentaires notables avec l'emploi de la récupération. Mais elles exigent un entraînement de la part du machiniste qui ne peut pas conduire les deux équipements de la même façon.

La question se compliquera par suite de l'usage établi de donner aux machinistes des primes d'économie. Pour que ces primes soient possibles, il faut que l'horaire ne soit pas tendu à l'extrême et que le machiniste ait le choix du moment opportun pour commencer la

Digitized by Google

course sur l'erre. Ces primes ont alors une signification intéressante dans le cas de l'emploi d'un système sans récupération. Lorsqu'on emploiera la récupération, la consommation d'énergie deviendra beaucoup plus indépendante de la conduite du train et l'on peut se demander si pratiquement la notion de prime d'économie pourra être maintenue. Il faudra donc trouver un moyen de remplacer cet avantage octroyé au personnel et consacré par l'usage. Il n'y a certes pas là un obstacle à l'emploi de la récupération, mais c'est une question qui demandera un examen sérieux quand celle-ci se généralisera.

D'autre part, dans l'hypothèse, envisagée plus haut, où le freinage récupérateur donne un effort plus faible que les freins normaux, il est nécessaire, pour la sécurité, de maintenir ceux-ci et de les employer concurremment avec le freinage par les moteurs. Il est donc nécessaire, d'une part de se préoccuper de rendre cette manœuvre simultanée aussi simple que possible et, d'autre part, de limiter, par des moyens appropriés, l'effort de freinage total afin d'éviter le patinage.

Enfin, dans le cas où l'on emploie les moteurs série pour freiner, comme ceux-ci, pendant les périodes de freinage, sont connectés pour la marche arrière, il y a lieu de prendre des précautions spéciales pour éviter le retour en arrière après l'arrêt.

Je n'insiste pas davantage ici sur toutes ces questions de freinage, très importantes, qui pourraient donner lieu à une étude spéciale et à un exposé distinct.

Le service de l'entretien ne peut évidemment demander qu'une chose à un système nouveau, c'est de ne pas exiger plus d'entretien et ne pas provoquer plus d'incidents que le système remplacé.

Les régulateurs de courant quels qu'ils soient, employés pour la récupération, sont tous des machines tournantes à collecteur. On peut penser qu'ils donneront satisfaction s'ils n'exigent pas plus d'entretien que les moteurs eux-mêmes. Il y a lieu toutefois de remarquer que les avaries de moteurs sur du matériel à bogies où le remplacement d'un bogie moteur est chose facile, sont peut-être moins gênantes que les avaries d'un groupe régulateur fixé au châssis de caisse. En tous cas, la difficulté dans la construction des premiers équipements à récupération, sera de réaliser des appareils solides mécaniquement et thermiquement sans atteindre des poids prohibitifs. L'accroissement de poids a en effet pour inconvénient de réduire l'économie réalisable et la capacité en voyageurs et d'augmenter la fatigue du matériel.

Enfin, le service du contrôle, qui a la charge de la sécurité des per-

Digitized by Google

sonnes, ne pourra qu'accueillir favorablement des systèmes dans lesquels les freins normaux seront doublés de freins récupérateurs, à la condition toutefois que ces derniers fonctionnent régulièrement et sans à-coups. Dans cet ordre d'idées, les constructeurs devront porter leur attention sur ce fait qu'un train en récupération est une usine génératrice ambulante, qui doit satisfaire à deux conditions en apparence contradictoires : maintenir un effort de freinage réglé à la valeur voulue par le machiniste et ne pas faire persister le courant sur la ligne dans tous les cas d'incidents sur celle-ci où les disjoncteurs des départs doivent agir.

VIII. — Conclusion.

Telles sont, je crois, les différentes exigences auxquelles devront faire face les systèmes de récupération. Aucune d'elles ne correspond à une difficulté technique insurmontable, mais il est indispensable qu'elles soient toutes satisfaites si l'on veut aboutir sur le point essentiel qui est la question financière. Nous ne sommes pas encore fixés sur l'avantage purement financier de l'emploi de la récupération. Celui-ci dépend du prix de vente d'équipements qui ne sont pas encore normalement sur le marché. Mais l'avantage économique, si l'on se place au point de vue des intérêts généraux, est évident et considérable. Or, il n'y a aucun doute que ce point de vue doive finalement triompher.

L'utilisation de l'énergie électrique en France, est à l'heure actuelle très inférieure à ce qu'elle pourrait être, si on la compare à celle de certains pays voisins. Mais elle croît rapidement d'année en année. Il faut donc créer de nouvelles sources d'énergie, et il est inadmissible de faire appel, pour satisfaire à un besoin nouveau, à l'énergie thermique, qui exige déjà l'importation en France de quantités considérables de combustibles. Il est indispensable, par suite, de recourir à l'énergie hydraulique, dont notre pays contient encore des réserves considérables. L'aménagement des chutes d'eau exige malheureusement des capitaux très importants et des délais assez grands. Il est à craindre, en conséquence, que la demande d'énergie ne se développe plus rapidement que les moyens de la satisfaire. C'est donc un devoir national de modérer cette demande aussi longtemps qu'elle exigera un accroissement des importations de combustibles. Le Conseil National économique s'est manifestement placé dans cet ordre d'idées, lorsqu'il a recommandé récemment, en même temps que l'utilisation

Digitized by Google

de l'énergie hydraulique, celle des gaz de haut-fourneaux. La lecture du rapport de M. E. Roy, dont le Conseil national économique a retenu sur ce dernier point les conclusions, montre que les économies d'énergie thermique que permet un emploi judicieux des gaz des haut-fourneaux, sont probablement d'un ordre de grandeur très supérieur à celui des économies à réaliser par l'emploi de la récupération en traction électrique. Mais, parmi les industries qui gaspillent actuellement l'énergie électrique, celle de la traction est une des plus importantes et une de celles pour lesquelles ce gaspillage est le plus évident.

On peut donc dire, sans toutefois exagérer l'importance de la récupération en traction électrique, qu'elle est d'intérêt national et qu'elle mérite d'être recherchée avec persévérance. Je souhaite donc que la discussion qui va s'ouvrir sur cette question à la Société Française des Electriciens, lui fasse faire un pas décisif en avant.

NOTE ANNEXE 1

Stabilité de la charge réalisée par l'anticompoundage.

1° Moteur à double enroulement d'excitation (fig. 2).

Soit U la tension aux bornes,

U_1 la f. é. m. du moteur,

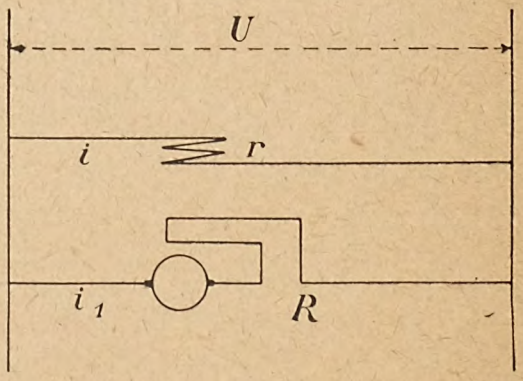


Fig. 2. — Moteur à double enroulement d'excitation.

r la résistance de l'enroulement fil fin,

i l'intensité du courant dans cet enroulement,

i_1 l'intensité du courant dans l'induit et l'enroulement gros fil,

R la résistance du circuit de l'induit et de l'enroulement gros fil,

v la vitesse du véhicule, liée à celle du moteur.

Digitized by Google

On a :

$$i = \frac{U}{r},$$

$$i_1 = \frac{U_1 - U}{R}.$$

Si les moteurs travaillent dans la branche supérieure de la caractéristique, on peut mettre U_1 sous la forme approchée :

$$U_1 = (A + Bi - B_1 i_1)v$$

A, B, B_1 étant des constantes.

De ces trois relations on tire en éliminant U_1 et i :

$$i_1 = \frac{Av - \left(1 - \frac{Bv}{r}\right)U}{R + B_1 v}.$$

D'où :

$$\frac{\partial i_1}{\partial U} = -\frac{1 - \frac{Bv}{r}}{R + B_1 v},$$

$$\frac{\partial i_1}{\partial v} = \frac{\left(A + \frac{B}{r}U\right)R + B_1 U}{(R + B_1 v)^2}.$$

On voit facilement que la présence du terme B_1 qui représente l'enroulement série, a pour effet de réduire les variations de i_1 avec U ou avec v.

2° Dispositif de la Westinghouse Electric C° (fig. 3).

Soit r la résistance des inducteurs des moteurs,

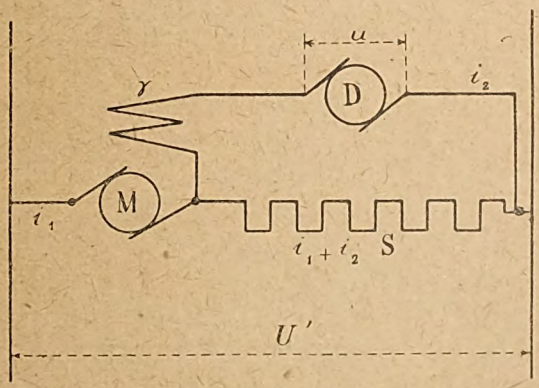


Fig. 3. — Dispositif de la Westinghouse C°.

R la résistance totale du circuit des moteurs,

U_1 la force électromotrice induite dans les moteurs,

Digitized by Google

U la différence de potentiel aux bornes de la distribution,
u la différence de potentiel aux bornes de l'excitatrice,
i_1 le courant dans les induits,
i_2 le courant dans les inducteurs.

La résistance S est parcourue par un courant $i_1 + i_2$ et l'on a la relation :

$$u = ri_2 + S(i_1 + i_2)$$

Si les moteurs travaillent dans la branche supérieure de la caractéristique, on peut, en désignant par A et B des constantes dépendant de la construction et du couplage des moteurs, mettre U_1 sous la forme approchée.

$$U_1 = (A + Bi_2)v.$$

Enfin on a :

$$i_1 = \frac{U_1 - U}{R}.$$

En éliminant i_2 et U_1 entre ces trois relations, on trouve l'expression suivante de i_1 en fonction de U et de v :

$$(1) \qquad i_1 = \frac{\dfrac{BVu}{r+S} + Av - U}{\dfrac{BSv}{r+S} + R}.$$

Les dérivées de i_1 par rapport à U et à v ont pour expression :

$$\frac{\partial i_1}{\partial U} = -\frac{1}{R + \dfrac{BSv}{r+S}},$$

$$\frac{\partial i_1}{\partial v} = \frac{R\left(\dfrac{Bu}{r+S} + A\right) + \dfrac{BSv}{r+S}}{\left(\dfrac{BSv}{r+S} + R\right)^2}.$$

Si, au lieu du système indiqué, on avait eu une excitation indépendante constante, l'intensité i_1 aurait été donnée par la relation :

$$i_1 = \frac{U_1 - U}{R},$$

U_1 étant constant.

Dans ce cas :

$$\frac{\partial i_1}{\partial U} = -\frac{1}{R},$$

$$\frac{\partial i_1}{\partial v} = 0.$$

Donc, pour une variation donnée de U, le système réduit la variation du courant récupéré.

Digitized by Google

On voit que cette réduction est d'autant plus grande que S est plus grand ; mais on ne peut pas augmenter trop S, pour ne pas exagérer les pertes d'énergie supplémentaire. On voit également que $\frac{\partial i_1}{\partial v}$ est indépendant de A. On peut donc appliquer la relation à la partie montante de la caractéristique. Mais alors B a une valeur beaucoup plus grande et par suite $\frac{\partial i_1}{\partial U}$ est encore plus faible. Ce résultat est particulièrement intéressant. C'est pour les faibles valeurs de l'intensité récupérée qu'il y a le plus grand intérêt à ce que cette intensité varie peu.

Dans le cas des variations de vitesse dues à une variation de l'effort résistant par exemple, la variation de l'intensité récupérée produite par le système est telle que l'effort moteur varie dans le même sens que l'effort résistant.

NOTE ANNEXE II

Etude de la stabilité du système S.T.A.R.

Principe du système S.T.A.R.

Le système S.T.A.R., tel qu'il a été réalisé au début, comprend une dévoltrice ou régulatrice D, mise en série avec les moteurs de

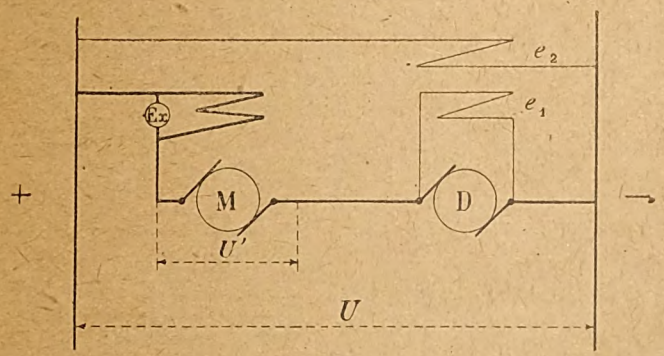


Fig. 4. — Système S.T.A.R.

traction M. Au démarrage, les moteurs de traction sont excités en série, suivant l'usage ordinaire. Pour la récupération, on branche aux bornes de leurs inducteurs une excitatrice E_x (fig. 4). La dévoltrice est pourvue de deux enroulements d'excitation, l'un, e_1 branché à ses bornes, l'autre e_2 aux bornes de la distribution. Elle est entraînée par

Digitized by Google

un moteur pourvu également de deux enroulements d'excitation, l'un en dérivation, l'autre en série et de sens tel qu'il tende à maintenir la vitesse constante malgré les variations de charge ou de tension.

Supposons cette dernière condition de vitesse constante de la dévoltrice rigoureusement réalisée.

Soient :

U la différence de potentiel aux bornes de la distribution,

U′ la différence de potentiel aux bornes des moteurs M,

U_0 la force électromotrice que produirait l'enroulement d'excitation e_2 s'il était seul, et qui est constante pour une vitesse donnée de la régulatrice,

R la résistance de l'enroulement e_1,

r la résistance de l'induit de la dévoltrice,

I l'intensité du courant dans le circuit commun de la dévoltrice et des moteurs de traction.

La dévoltrice est peu saturée, de sorte que la force électromotrice produite à ses bornes par l'enroulement e_1, s'il était seul, serait de la forme $k\,\frac{U - U'}{R}$, k étant une constante pour une vitesse donnée de la régulatrice.

Le régime étant établi, on a la relation suivante :

$$U - U' = - U_0 + k\,\frac{U - U'}{R} + rI. \qquad (1)$$

Si, par construction, nous réalisons la condition :

$$k = R \qquad (2)$$

la relation (1) se réduit à :

$$I = \frac{U_0}{r}, \qquad (3)$$

c'est-à-dire que l'intensité I se maintient constante, tant que la tension de distribution se maintient elle-même constante. La marche en moteur ou en récupération étant définie par le signe de I, on voit qu'il est indispensable de changer le sens de l'enroulement e_2 en même temps que celui des inducteurs des moteurs M quand on passe de la marche en moteurs à la marche en récupération. Comme nous l'avons vu, k n'est constant que pour une vitesse donnée de la régulatrice. L'équilibre entre k et R est donc assez précaire, et il est utile d'examiner ce qui se passe si l'égalité (2) n'est pas exactement satisfaite.

Digitized by Google

Nous pouvons poser approximativement, en assimilant la caractéristique des moteurs à une droite ne passant pas par l'origine :

$$U' = K'I + U'' \tag{4}$$

K′ et U′ sont proportionnels à la vitesse des moteurs.

Des relations (1) et (4), on déduit :

$$I = \frac{-U_0 - \left(1 - \frac{k}{R}\right)(U - U'')}{K'\left(1 - \frac{k}{R}\right) \quad r}, \tag{5}$$

U — U″ peut être grand par rapport à U_0 ; de même K′ peut être grand par rapport à r ; il suffit donc d'un écart assez faible entre k et R pour que les valeurs du numérateur et du dénominateur varient dans des proportions considérables. On remarquera que K′ et U″ doivent changer de signe en même temps que U_0, quand on inverse le sens des inducteurs pour passer de la marche en moteur à la marche en récupération.

Ainsi, en supposant U et I positifs, quand les moteurs de traction fonctionnent en moteurs, U_0, K′ et U″ seront positifs lorsque les moteurs de traction marcheront en moteurs, négatifs quand les moteurs de traction fonctionneront en génératrices pour la récupération.

Stabilité électrique du système S.T.A.R.

Nous allons étudier, d'après les principes rappelés dans la note principale, la stabilité électrique du système S.T.A.R.

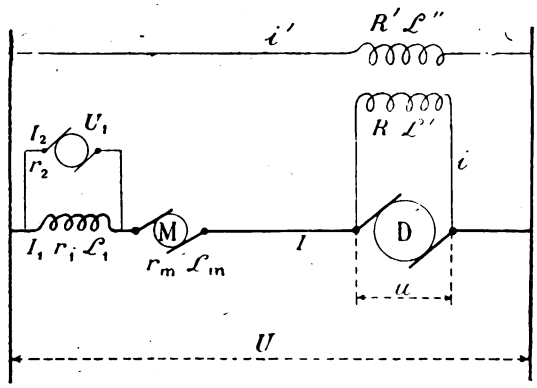


Fig. 5. - Schéma pour l'étude de la stabilité du système S.T.A.R.

Soient (fig. 5) :

U la différence de potentiel aux bornes de la distribution; nous la supposons constante,

Digitized by Google

I l'intensité de courant dans l'induit des moteurs de traction, que nous supposerons également être celle qui passe dans l'induit de la dévoltrice, en négligeant le courant dans l'inducteur shunt de celle-ci.

r et L la résistance et l'inductance de l'induit de la dévoltrice.

i l'intensité dans l'inducteur e_1, de résistance R, d'inductance L'.

i' l'intensité dans l'inducteur e_2, de résistance R', d'inductance L''.

M le coefficient d'induction mutuelle entre ces deux inducteurs.

I_1 l'intensité dans l'ensemble des inducteurs des moteurs, de résistance r_1, d'inductance L_1.

U_1 la force électromotrice de l'excitatrice.

$I_2 = I - I_1$ le courant qui la parcourt.

r_2 sa résistance.

Nous supposons U_1 constant et nous négligeons l'inductance de l'excitatrice.

u la différence de potentiel aux bornes de la dévoltrice.

ki, $k'i$, les forces électromotrices respectivement développées par les inducteurs e_1 et e_2

ki, $k'i$, les forces électromotrices respectivement développées par les moteurs.

r_m, L_m la résistance et l'inductance du groupe des induits des moteurs M.

Par construction, nous avons, pour le réglage en S.T.A.R.

$$k = R.$$

D'autre part, en négligeant les fuites, les coefficients L', L'' et M sont liés par la relation

$$M^2 = L'L''. \tag{6}$$

Nous avons enfin les relations suivantes entre les différences de potentiel et les intensités :

$$u = ki - k'i' + rI + L\frac{dI}{dt}, \tag{7}$$

$$u = Ri + L'\frac{di}{dt} + M\frac{di'}{dt}, \tag{8}$$

$$U = R'i' + L''\frac{di'}{dt} + M\frac{di}{dt}, \tag{9}$$

$$U = u + K_1I_1 + r_1I_1 + L_1\frac{dI_1}{dt} + r_mI + L_m\frac{dI}{dt}, \tag{10}$$

$$U_1 + r_2(I - I_1) = r_1I_1 + L_1\frac{dI_1}{dt}. \tag{11}$$

Digitized by Google

En éliminant u et i entre les relations (7), (8) et (9) et tenant compte des relations (2) et (6), nous trouvons :

$$(12) \qquad rI + L\frac{dI}{dt} = L'\frac{U}{M} + \left(k' - \frac{L'R'}{M}\right)i'.$$

Posons :

$$u = u_0 + C_1 e^{\rho_1 t} + C_2 e^{\rho_2 t} + \cdots,$$
$$I_1 = B_0 + B_1 e^{\rho_1 t} + B_2 e^{\rho_2 t} + \cdots.$$

De la relation (11) nous tirons l'expression de I en fonction de I_1; nous portons cette expression dans la relation (10) qui, par identification, donne les valeurs de B_0, B_1, B_2, en fonction de u_0, C_1, C_2.

Nous pouvons alors déduire i' de la relation (12) et i de la relation (7).

La relation (9) doit être satisfaite par les valeurs de i et de i' ainsi trouvées. Nous en déduisons donc par identification la relation de condition qui doit donner les valeurs de ρ_1, ρ_2, etc..., et qui est la suivante :

$$\left[1 + \frac{r_1}{r_2} + \frac{L_1}{r_2}\rho\right](r + L\rho)\left[R' + \left(L' + \frac{R'L'}{k}\rho\right)\right].$$

$$(13) \quad -\frac{M\rho}{k}\left(k' - \frac{L'R'}{M}\right)\left\{\left[r_m\left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) + K_1 + r_1\right]\right.$$
$$\left. + \left[r_m\frac{L_1}{r_2} + L_m\left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) + L_1\right]\rho + \frac{L_m L_1}{r_2}\rho_2\right\}.$$

On peut assigner aux différentes résistances et inductances, ainsi qu'aux coefficients k, k' et k_1 des valeurs relatives qui représentent tout au moins l'ordre de grandeur de ces différents éléments. Nous avons fait ce travail en nous basant, pour les inductances, sur des relations que nous avons établies autrefois dans une communication à la Société Française des Electriciens (sur le criterium de bonne commutation de M. Mauduit et la commutation en régime variable, janvier 1914).

La conclusion à laquelle nous sommes ainsi parvenus est que, aussi bien pour la marche en récupération ($K_1 < 0$) que pour la marche en moteurs, ($K_1 > 0$), l'équation (13) a seulement une racine réelle négative. Mais, dans le cas de la marche en moteurs, les racines imaginaires correspondent toujours au régime stable après oscillations, tandis que, dans la marche en récupération, ce résultat n'est obtenu que pour une valeur suffisamment faible de r_2. Si r_2 est trop grand, il y a instabilité complète.

Il est à remarquer que le cas que nous venons d'examiner n'est

Digitized by Google

celui du système S.T.A.R. que pour la récupération, l'excitatrice n'étant pas employée au démarrage.

Les diagrammes publiés par M. LEGOUEZ (*Bulletin de la Société Française des Electriciens*, décembre 1913) sur l'application du système S.T.A.R. au métropolitain de Paris, montrent bien des oscillations marquées au début du freinage et d'autres oscillations moins prononcées pendant presque toute la durée de ce freinage. Pour bien se rendre compte des influences respectives de la dévoltrice et de l'excitatrice, il n'est pas inutile d'examiner, au même point de vue, des montages dans lesquels ces deux éléments n'existent pas.

Supposons d'abord la dévoltrice maintenue, l'excitatrice supprimée. La relation de condition se déduit de celle du cas précédent, en faisant dans celle-ci r_2 infini. Son degré s'abaisse au second et, en prenant pour les résistances et les inductances les mêmes valeurs relatives qu'au cas précédent, on trouve les résultats suivants :

Pour la marche en moteurs : deux racines réelles et négatives, donc établissement sans à-coups d'un régime stable. Ce cas correspond au fonctionnement normal du système S.T.A.R. pour le démarrage.

Pour la marche en génératrice : deux racines positives, c'est-à-dire instabilité complète, l'intensité atteint une valeur excessive. *Donc, l'excitatrice est absolument indispensable au système S.T.A.R. pour le freinage récupérateur.*

Examinons maintenant le cas où l'excitatrice est maintenue, mais où il n'est pas fait emploi de dévoltrice. Ce cas serait celui qui correspondrait à l'adaptation d'un équipement ordinaire de traction à la récupération *sur les pentes*, en adjoignant simplement une excitatrice aux bornes des inducteurs des moteurs série. On obtient son équation de condition en faisant $L = r = 0$ dans l'équation (13), ce qui abaisse encore son degré au second. Le résultat est le suivant :

Dans la marche en moteurs ($K_1 > 0$) l'équation a toujours deux racines négatives. La marche est stable.

Dans la marche en récupération ($K_1 < 0$), l'équation a également deux racines négatives, *à la condition que* r_2 *soit* suffisamment petit, sinon l'une des racines est positive, la stabilité n'est pas assurée.

A titre de vérification, nous examinerons enfin le cas où il n'y a ni excitatrice ni dévoltrice, caractérisé par le fait que r_2 devient infini, L et r nuls. L'équation (13) se réduit alors à :

Digitized by Google

$$(K_1 + r_m + r_1) + (L_1 + L_m)\rho = 0,$$

K_1 étant grand par rapport à $r_m + r_1$, on vérifie bien que la stabilité est assurée pour la marche en moteurs, alors que la marche en récupération est instable.

Stabilité mécanique du système S.T.A.R.

Lorsqu'on établit la marche en récupération, la dévoltrice se met à marcher en moteur, entraînant son moteur, dont la vitesse tend ainsi à s'accroître; le coefficient k tend donc à augmenter et à devenir plus grand que R. Nous avons vu que, dans la relation (5) nous devions, dans ce cas, faire K′ et U_0 négatifs. On voit donc que le numérateur tend à augmenter et le dénominateur à diminuer, d'où une pointe d'intensité notable.

Au moment de l'établissement de la marche en moteurs, la dévoltrice marche en génératrice. La vitesse de son moteur tend à diminuer, le coefficient k diminue. U_0 et K′ étant positifs dans ce cas, on voit que, comme dans le cas de la récupération, le numérateur augmente et le dénominateur diminue. Il y a également tendance à une pointe d'intensité. Il est en tous cas certain que les oscillations électriques qui se produisent au moment de l'établissement de la récupération peuvent être amplifiées par leur répercussion sur le couple du moteur de la régulatrice.

NOTE ANNEXE III

Système a intensité constante de M. Boucherot.

Système du pont simple.

Le dispositif suivant, permettant de constituer en courant continu un circuit à intensité constante alimenté par un réseau à tension constante, a été décrit en 1904 par M. Boucherot, qui l'avait breveté en 1898 (*Bulletin de la Société Française des Electriciens*, février 1904) : Entre les bornes A, B du réseau à tension constante, sont branchées en série deux machines identiques S_1, S_2 (fig. 6) excitées elles-mêmes en série et utilisées dans la partie droite de la caractéristique, de telle façon que la tension aux bornes soit proportionnelle à l'intensité qui les traverse. Le circuit d'utilisation est branché aux bornes de l'une des machines S_2.

Ces deux machines sont entraînées à la même vitesse par un moteur

Digitized by Google

quelconque recevant son énergie du réseau, l'ensemble formant ce que nous appellerons le groupe régulateur. Les inducteurs des machines S_1, S_2 sont branchés de telle façon que, si elles sont parcourues par un même courant, leurs forces électromotrices s'opposent dans le circuit A.B. Dans ces conditions, si le circuit d'utilisation était ouvert, la tension aux bornes de chacune des machines tendrait à monter indéfiniment et ne serait limitée que par la saturation du fer. La présence du circuit d'utilisation a pour effet de limiter la tension aux bornes de

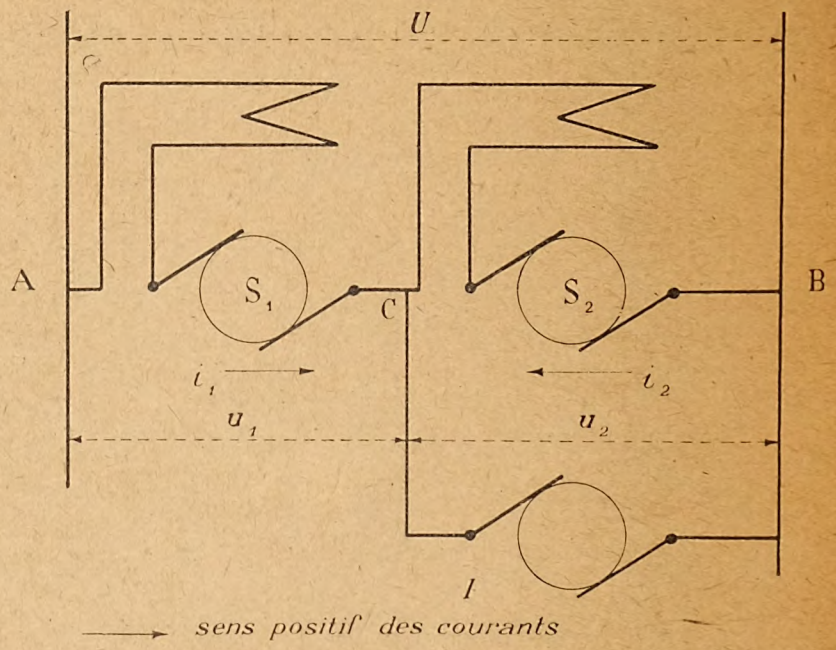


Fig. 6. — Système Boucherot à intensité constante. Pont simple.

la machine S_2 à une valeur égale, à la chute ohmique près, à celle de la force contre-électromotrice induite dans le circuit d'utilisation.

Soient i_1, i_2 les courants dans chacune des machines S_1 S_2, les signes de i_1, et i_2 étant pris les mêmes si ces deux courants vont dans le même sens sur la fig. (6).

Soient U_1 et U_2 les différences de potentiel aux bornes des machines S_1 et S_2. D'après ce qui précède, on a par construction :

$$U_1 = ki_1$$
$$U_2 = ki_2$$

En appelant U la différence de potentiel entre A et B, on a donc :

$$U = U_1 + U_2 = k\,(i_1 - i_2)$$

Digitized by Google

Or, le courant I qui parcourt le circuit d'utilisation a pour valeur :

$$I = i_1 - i_2$$

On a donc :

$$I = \frac{U}{k}.$$

Le courant I reste automatiquement proportionnel à la tension aux bornes A, B, et par suite constant, si cette tension reste elle-même constante.

Le graphique de la fig. (7) permet de déterminer les valeurs des intensités et des différences de potentiel dans les différentes parties du

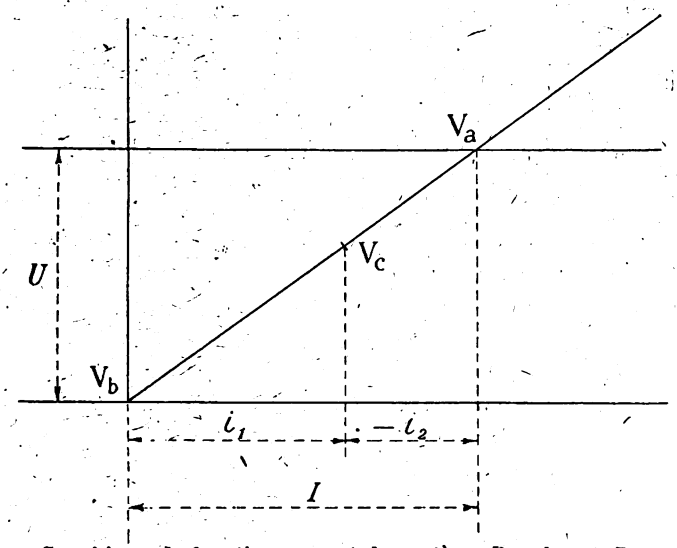


Fig. 7. — Graphique de fonctionnement du système Boucherot. Pont simple.

circuit représenté figure (6), suivant les valeurs prises par la différence de potentiel aux bornes du circuit d'utilisation. En abscisses sont portées les valeurs des intensités, en ordonnées les différences de potentiel.

Les potentiels des points A, B, C sont désignés par V_a, V_b, V_c. On voit sur ce graphique que, si l'on pouvait admettre que les caractéristiques restent droites pour toutes les valeurs des intensités, la différence de potentiel aux bornes du circuit d'utilisation pourrait varier de $-\infty$ à $+\infty$.

Système du pont en losange.

Le dispositif qui précède correspond à une mauvaise utilisation de la puissance du matériel constituant le groupe régulateur ; nous nous

Digitized by Google

contentons de signaler ce fait sans le discuter à fond et nous passons aux dispositifs plus complets décrits par MM. Boucherot et Brunswick (1).

Au lieu de deux machines S_1 S_2, disposons quatre machines identiques S_1, S_2, S_3, S_4, en deux séries parallèles, comme l'indique le schéma de la fig. (8). Ces machines sont excitées en série et utilisées dans la partie droite de la caractéristique. Elles sont toutes entraînées

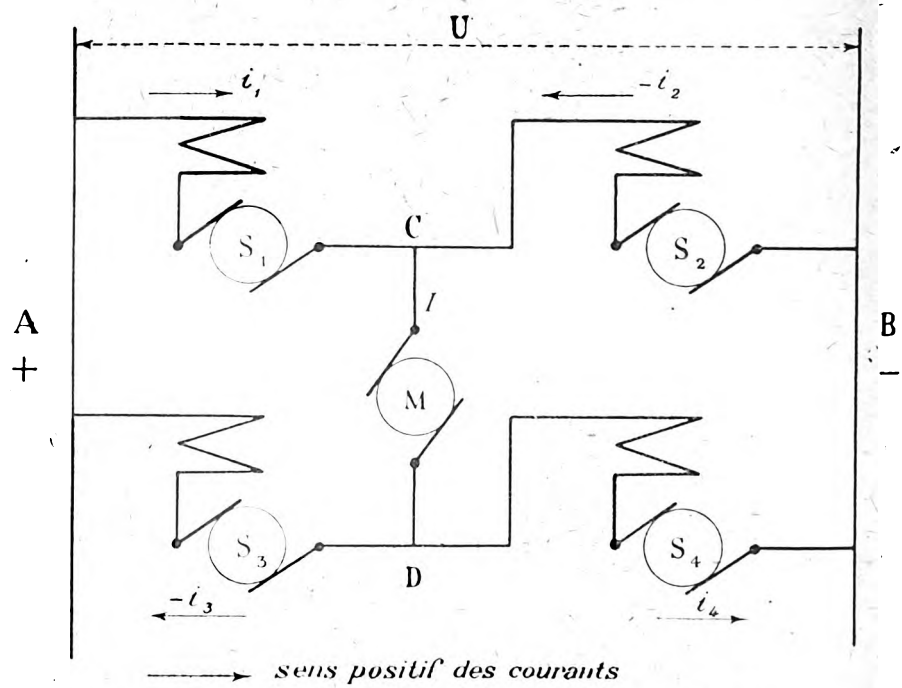


Fig. 8. — Système Boucherot-Brunswick. Pont en losange.

à la même vitesse par un moteur recevant son courant de la ligne A. B. Le circuit d'utilisation est branché entre les points C et D, bornes intermédiaires des deux séries de machines.

L'ensemble que nous venons de décrire répond au schéma bien connu du pont de Wheatstone, qu'on a l'habitude de représenter sous forme d'un losange. Nous nous servirons de ce terme pour désigner d'un mot la disposition de l'ensemble des machines considérées.

Les sens des forces électromotrices sont tels que les différences de potentiel s'opposent dans le circuit de S_3 et de S_4 quand ces deux machines sont parcourues par un même courant ; il en est de même pour

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, février 1904.

Digitized by Google

S_1 et S_2. De plus, les différences de potentiel $V_D - V_A$ et $V_C - V_A$ sont de signes contraires lorsque les courants vont dans les sens AC et AD. On a donc, avec les mêmes notations que précédemment, et en appelant de plus U' la différence de potentiel entre C et D :

$$U_1 = ki_1$$
$$U_2 = ki_2$$
$$U_3 = ki_3$$
$$U_4 = ki_4$$

On a donc :

$$U = U_1 + U_2 = U_3 + U_4 = k\,(i_1 - i_2) = k\,(i_4 - i_3)$$

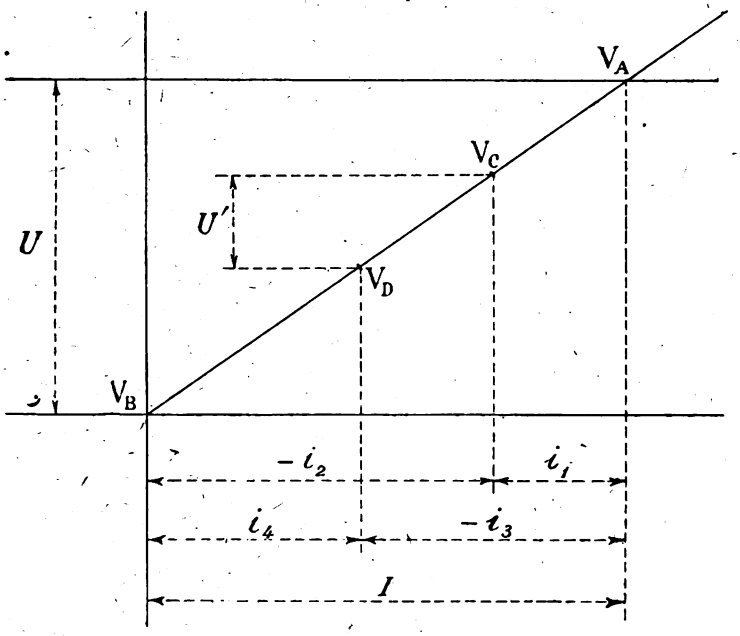


Fig. 9.

On a d'autre part :

$$I = i_1 - i_2 = i_4 - i_3$$

Par suite :

$$I = \frac{U}{k}.$$

Le courant dans le circuit d'utilisation est encore proportionnel à la différence de potentiel entre A et B.

On a enfin :

$$U' = V_C - V_D = U_1 - U_3 = k(i_1 + i_3) = U_4 - U_2 = k(i_4 + i_2).$$

Le graphique figure 9 indique les valeurs des différences de potentiel en fonction des intensités pour chacune des machines. On

Digitized by Google

remarquera qu'il manque une relation pour que le problème tel qu'il a été posé soit déterminé. Suivant la valeur prise par la différence de potentiel aux bornes d'une des machines S_1, S_2, S_3, S_4, les différences de potentiel aux bornes des autres seront déterminées. Mais rien ne fixant la première, il pourra se produire des variations des tensions des quatre machines qui ne seront limitées par rien. Les conditions de fonctionnement indiquées correspondent donc à un régime complètement instable.

Mais pratiquement, ces conditions ne seront pas réalisées, la proportionnalité de la force électromotrice à l'intensité n'étant qu'approximative, même aux faibles valeurs de l'induction magnétique.

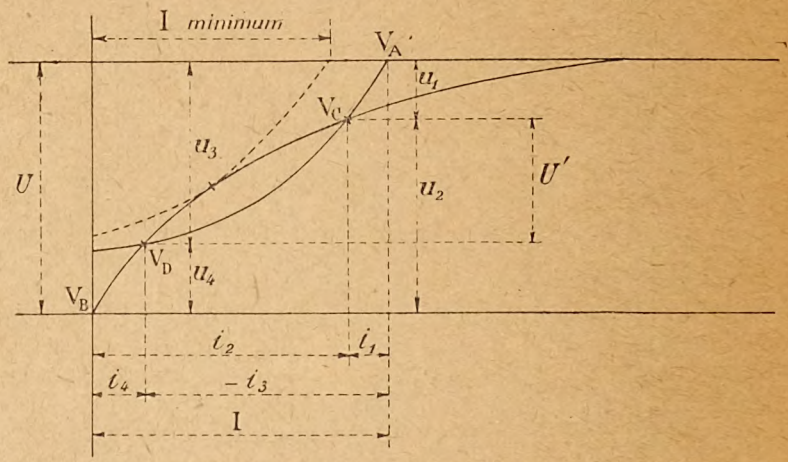


Fig. 10. — Graphique de fonctionnement du système Boucherot-Brunswick.

Les relations qui définissent le problème doivent donc s'écrire :

$$\begin{aligned}
&U_1 = f(i_1),\\
&U_2 = f(-i_2) = -f(i_2),\\
&U_3 = f(-i_3) = -f(i_3),\\
&U_4 = f(i_4).\\
&I = i_1 - i_2 = i_4 - i_3,\\
&U = U_1 + U_2 = U_3 + U_4.
\end{aligned}$$

On en déduit :

$$f(i_1) - f(i_2) = f(i_4) - f(i_3) = f(i_2 + I) - f(i_2) = f(i_3 + I) - f(i_3)$$
$$= I f'(i_2) + \frac{I^2}{2} f''(i_2) + \cdots = I f'(i_3) + \frac{I^2}{2} f''(i_3) + \cdots.$$

Le cas où $f'(i)$ est constant est celui que nous avons examiné tout d'abord ; et pour lequel les valeurs des intensités sont indéterminées. Mais si $f'(i)$ est fonction de i, les relations précédentes exigent que l'on ait :

Digitized by Google

$$i_2 = i_3$$
$$i_1 = i_4 \ldots$$

Mais dans ce cas, I n'est plus constant. Le graphique figure 10

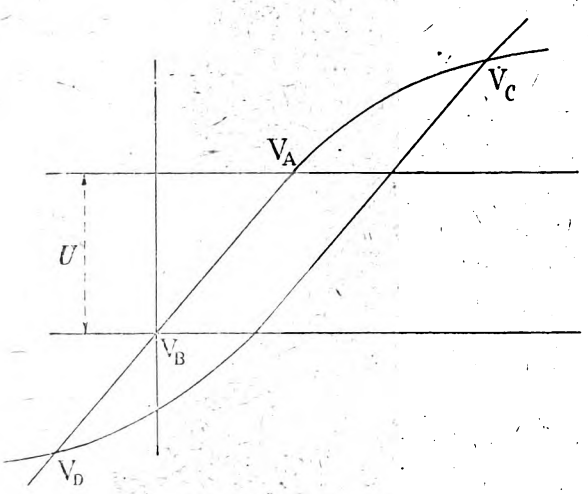


Fig 11.

montre qu'il a une valeur minimum pour $U' = 0$ et croît en même temps que U'. Le régime pourrait être complètement instable pour certaines applications. Pour que la variation de I ne soit pas trop considérable, il faut que, dans les limites pratiques d'application, c'est-à-

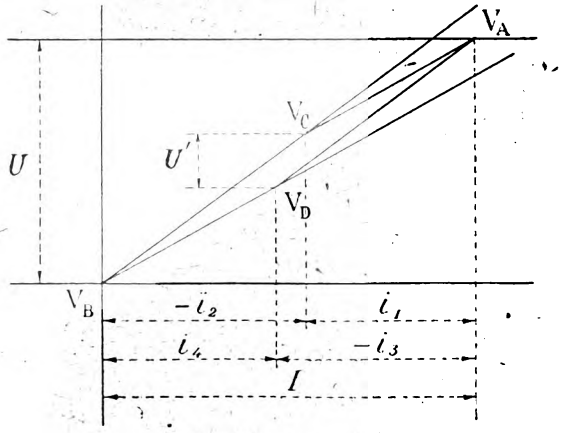


Fig. 12.

dire, en général, comme nous le verrons, pour des tensions U' ne dépassant pas beaucoup U, les caractéristiques restent droites (fig. 11). Dans ce cas, on peut encore réaliser la stabilité en donnant des valeurs légèrement différentes aux coefficients de proportionnalité (fig. 12).

Digitized by Google

Dans ces conditions, il y aura une variation de I qui sera d'autant plus petite que l'écart entre les coefficients sera plus faible. Nous pouvons donc, comme première approximation, poursuivre l'étude de ce dispositif dans les premières conditions examinées, c'est-à-

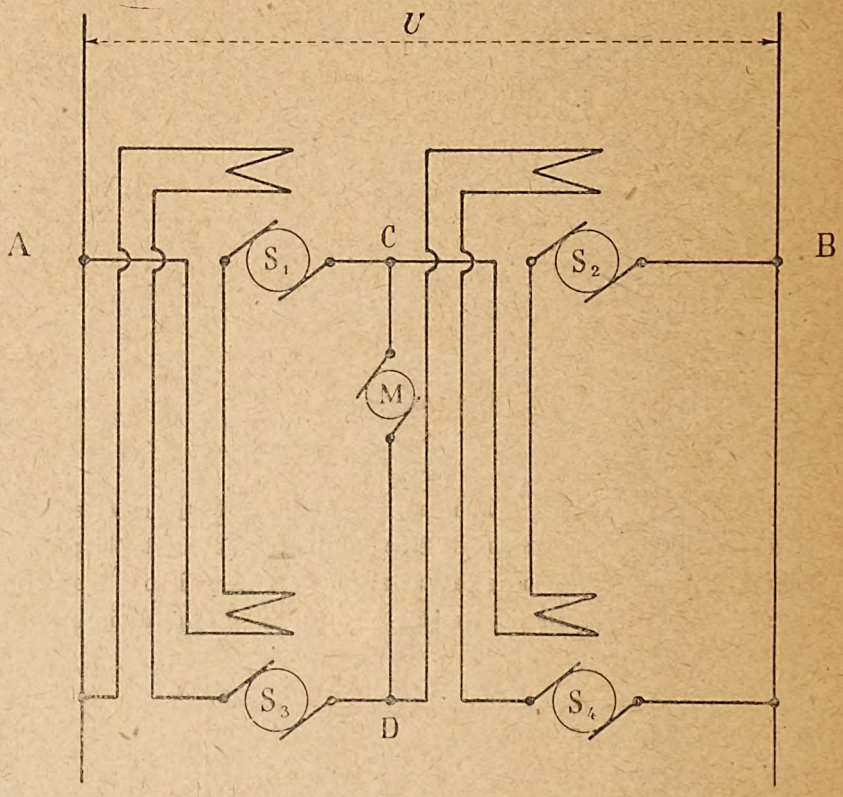


Fig. 13. — Système du pont en losange à excitations croisées.

dire même proportionnalité des forces électromotrices aux intensités pour les 4 machines.

La puissance demandée par l'ensemble de ces machines a pour valeur :

$$P = k(i_1^2 - i_2^2 - i_3^2 + i_4^2) = 2k(i_1^2 - i_2^2) = 2UI.$$

On voit que, abstraction faite des pertes, la puissance totale des machines qui constituent le groupe régulateur doit être *grosso modo* au moins égale à quatre fois celle des moteurs qu'il s'agit d'alimenter. Il est donc inutile de pousser plus loin l'examen de ce dispositif, qui est complètement inadmissible au point de vue économique.

Digitized by Google

Système du pont en losange à excitations croisées.

Il est heureusement possible de réduire la puissance totale du groupe régulateur en croisant les excitations des machines comme l'indique la figure 13.

On réalise ainsi les relations suivantes :

$$\begin{aligned} U_1 &= f(i_3), \\ U_2 &= f(-i_4) = -f(i_4), \\ U_3 &= f(i_1) = -f(i_1), \\ U_4 &= f(i_2), \\ I &= i_1 - i_2 = i_4 - i_3, \\ U &= U_1 + U_2 = U_3 + U_4. \end{aligned}$$

On démontre, comme dans le cas précédent, que l'on a ainsi nécessairement :

$$\begin{aligned} i_2 &= i_3 \\ i_1 &= i_4 \end{aligned}$$

I est aussi sensiblement constant, si les caractéristiques sont à peu près droites.

Stabilité de tension des machines S.

On peut d'ailleurs, comme précédemment, obtenir la stabilité de la tension des machines S en donnant des inclinaisons légèrement différentes aux caractéristiques. Posons, par exemple ;

$$\begin{aligned} U_1 &= k_1\, i_3 \\ U_2 &= k_2\, i_4 \\ U_3 &= k_3\, i_1 \\ U_4 &= k_4\, i_2 \end{aligned}$$

Nous avons toujours :

$$I = i_1 - i_2 = i_4 - i_3$$

et

$$U = U_1 + U_2 = U_3 + U_4 = (k_1 + k_2)i_3 - k_2 I = (k_4 - k_3)i_2 - k_3 I.$$

En faisant :

$$\begin{aligned} k_2 &= k_3 \\ k_4 &= k_1 \end{aligned}$$

On aura, comme précédemment :

$$\begin{aligned} i_3 &= i_2 \\ i_4 &= i_1 \end{aligned}$$

et la stabilité sera réalisée, aux dépens de la constance de I, en donnant une valeur non nulle à la différence $k_1 - k_2$.

Digitized by Google

Puissance des machines du groupe régulateur.

Pour déterminer approximativement la puissance, nous supposerons $k_1 = k_2$. Nous aurons donc :

$$P = k\,(i_1\,i_3 - i_2\,i_4 - i_1\,i_3 + i_2\,i_4) = 0.$$

La puissance du moteur du groupe régulateur doit donc être simplement suffisante pour entraîner le groupe à vide. On voit de plus, facilement, que la puissance maxima demandée à chaque machine, si l'on utilise le groupe seulement pour les valeurs de U ne dépassant pas U_1, est égale à $\frac{UI}{4}$.

La puissance totale du groupe régulateur est donc au plus du même ordre que celle des moteurs à desservir. Nous préciserons plus loin cette puissance, mais nous voyons dès maintenant que, dans ces nouvelles conditions, le dispositif étudié mérite d'être pris en considération.

Nous rechercherons d'abord comment la puissance se répartit entre les machines S et les appareils d'utilisation M, suivant les diverses conditions de marche des moteurs de traction, en continuant à admettre $k_1 = k_2$.

La figure 14 indique quelles sont les conditions de fonctionnement de ces machines dans les différentes hypothèses suivantes :

I. — Les moteurs M fonctionnent en *moteurs* à une tension *inférieure* à celle du réseau.

II. — Les moteurs M fonctionnent en *moteurs* à une tension *supérieure* à celle du réseau.

III. — Les moteurs M fonctionnent en *génératrices* à une tension *inférieure* à celle du réseau.

IV. — Les moteurs M fonctionnent en *génératrices* à une tension *supérieure* à celle du réseau.

Les relations entre les intensités et les forces électromotrices sont les suivantes :

$$U_1 = ki_3 = ki_2$$
$$U_2 = ki_4 = -ki_1$$
$$U_3 = -ki_1$$
$$U_4 = ki_2$$
$$I = i_2 - i_1 = \frac{U}{k}.$$

La tension aux bornes des moteurs est :

$$U' = V_D - V_C = U_3 - U_1 = -k(i_1 + i_3) = -k(i_1 + i_2).$$

Digitized by Google

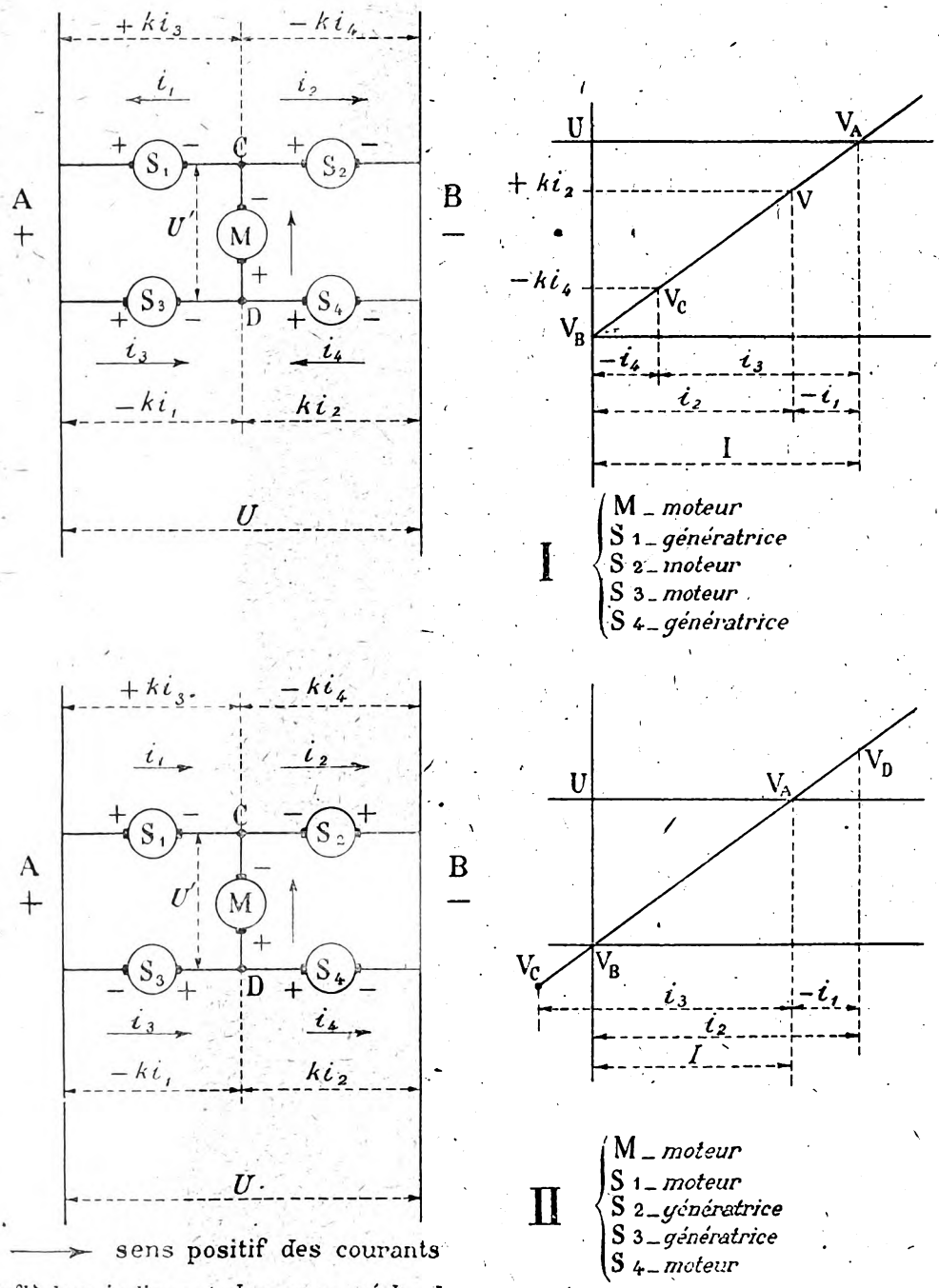
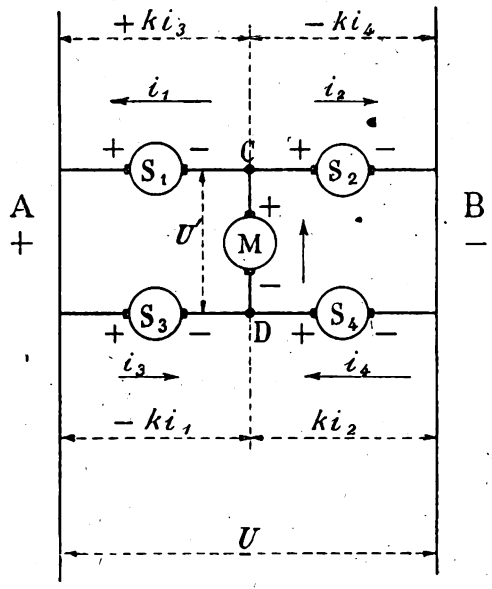
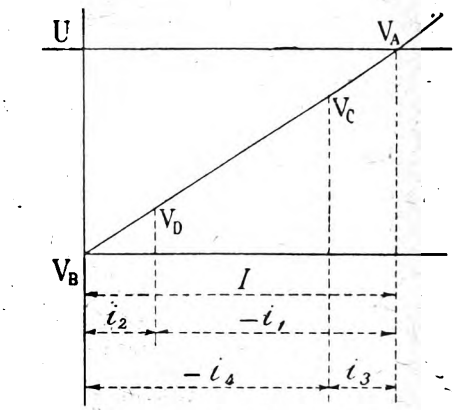


Fig. 14 (I et II). — Conditions de fonctionnement du pont à excitations croisées.

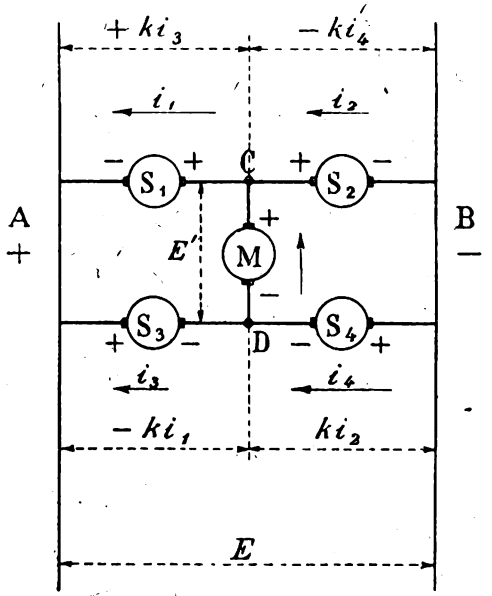
Digitized by Google

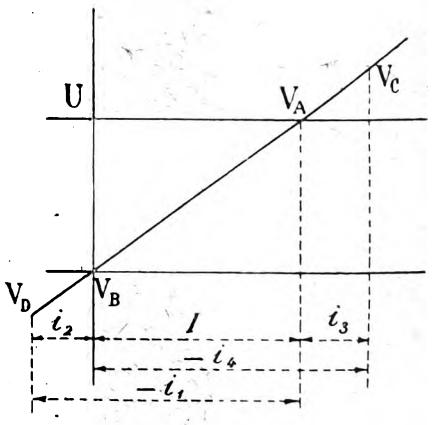




III

M — génératrice (récupération)
S 1 — génératrice
S 2 — moteur
S 3 — moteur
S 4 — génératrice





IV

M — génératrice (récupération)
S 1 — moteur
S 2 — génératrice
S 3 — génératrice
S 4 — moteur

⟶ Sens positif des courants

N B. — Les flèches indiquent le sens réel des courants.

Fig. 14 (III et IV).

Digitized by Google

On déduit de ces relations :

$$i_1 = -\frac{U + U'}{2k},$$

$$i_2 = \frac{U - U'}{2k}.$$

Les puissances P_1, P_2 des machines S_1 et S_2 ont pour valeur :

$$P_1 = -P_2 = ki_1i_2 = -\frac{U^2 - U'^2}{4k}.$$

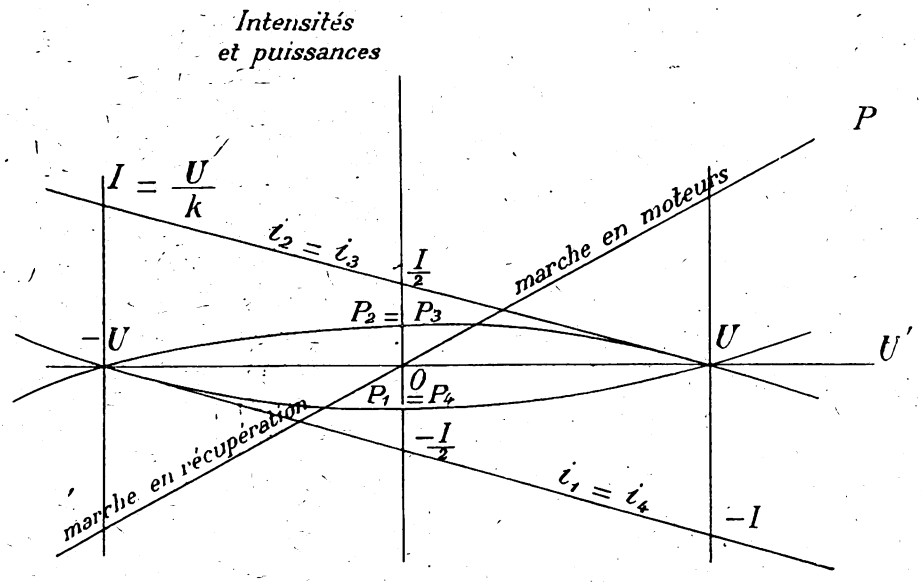


Fig. 15.

Les puissances P_3 et P_4 des machines S_3 et S_4 sont respectivement égales à P_2 et P_1.

La puissance demandée par les moteurs a pour valeur :

$$P = U'I = \frac{UU'}{k}.$$

La figure 15 représente la variation des puissances en fonction de U'.

On voit que, si U' ne dépasse pas U, la puissance maxima demandée à chacune des machines du groupe ne dépasse pas le quart de la puissance maxima P des moteurs au démarrage et que cette puissance est demandée au moment où les moteurs sont arrêtés, c'est-à-dire aux premiers instants du démarrage ou à la fin du freinage.

Digitized by Google

Stabilité de marche du système en cas de variation de la tension de distribution.

En supposant toujours que U′ ne dépasse pas U, et tenant compte des valeurs différentes de k_1 et k_2, la figure 16 indique comment varie I, lorsque U reste constant. Nous pouvons nous proposer de chercher comment U′ varie lorsque U subit des variations.

Nous avons, d'après la figure 11 :

$$(1) \qquad I = \frac{U}{2}\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right) + \frac{U'}{2}\left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1}\right).$$

Nous supposerons qu'il s'agit d'une variation rapide de U.

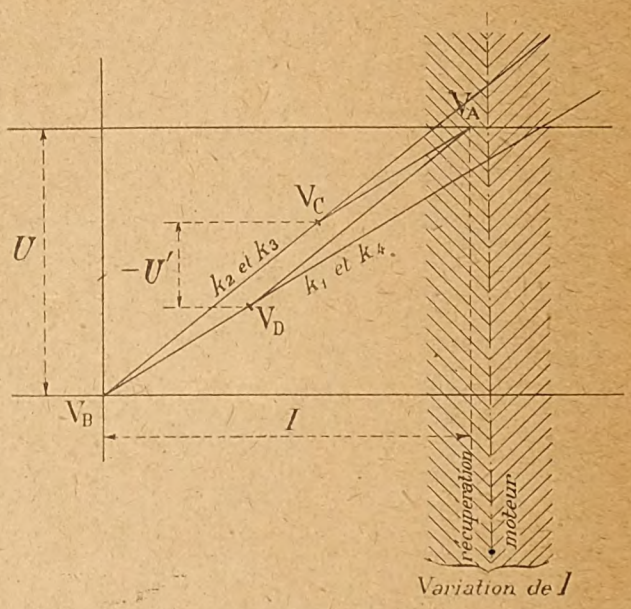


Fig. 16.

Dans ces conditions, on peut admettre que la vitesse des moteurs n'a pas le temps de varier pendant que U′ effectue la variation correspondant à celle de U. U′ et I sont ainsi liés par la caractéristique des moteurs à vitesse constante.

Dans les limites d'une variation peu étendue on peut poser :

$$\frac{\Delta U'}{\Delta I} = K.$$

K étant le coefficient angulaire de la tangente à la caractéristique.

Remarquons de suite que la valeur maxima de K pour l'intensité I, qui est sensiblement constante, correspond à la valeur maxima de

Digitized by Google

U′, c'est-à-dire U, et que, pour cette valeur de U′, K est notablement plus petit que k, valeur moyenne de k_1 et k_2, puisqu'il correspond à un point de la caractéristique plus voisine de la saturation. K est donc toujours petit par rapport à k.

Nous tirons de la relation (1) :

$$\frac{\Delta I}{\Delta U'} = \frac{1}{K} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)\frac{\Delta U}{\Delta U'} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1}\right),$$

d'où

$$\frac{\Delta U'}{\Delta U} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)\frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1}\right)}.$$

D'après la remarque faite plus haut sur la valeur de K, et de plus k_1 étant peu différent de k_2, on a en première approximation :

$$\frac{\Delta U'}{\Delta U} = \frac{K}{k}.$$

U′ varie donc moins vite que U. Le système paraît devoir être très stable.

Période d'établissement du courant.

Il nous reste à examiner ce qui se passe au moment de l'établissement du courant. Remarquons tout d'abord que les différents circuits doivent être fermés tous en même temps, l'absence d'une des machines du groupe ou du circuit des moteurs pouvant provoquer des surintensités inadmissibles.

Dans ces conditions, nous pouvons supposer que, pendant la période d'établissement, I et U′ partent de zéro et tendent vers les valeurs qui correspondent à $I = \frac{U}{k}$.

Pendant cette période d'établissement, nous devons tenir compte des inductances L_1 de chacune des machines du groupe et de l'inductance L du circuit des moteurs.

Une fois le régime établi, U′ est lié à I par une relation :

$$U' = \varphi(I)$$

qui est représentée par la caractéristique du circuit des moteurs.

Nous mettrons $\varphi(I)$ sous la forme approchée $A + KI$, pour rendre le calcul possible. A et K seront positifs ou négatifs suivant que les moteurs de traction fonctionneront en moteurs ou en récupération. Ces deux coefficients sont, de plus, proportionnels à la vitesse des moteurs.

Digitized by Google

En raison de la grande inertie du train, nous supposons que cette vitesse ne varie pas pendant la durée de la période d'établissement.

Les relations entre les différences de potentiel et les intensités s'écrivent comme suit :

$$(2)\quad \begin{cases} U_1 = k_1 i_3 + L_1 \dfrac{di_1}{dt}, \\ U_2 = -k_2 i_4 + L_1 \dfrac{di_2}{dt}, \\ U_3 = -k_3 i_1 + L_1 \dfrac{di_3}{dt}, \\ U_4 = k_4 i_2 + L_1 \dfrac{di_4}{dt}, \\ U' = A + KI + L \dfrac{dI}{dt} = U_3 - U_4, \\ U = U_1 + U_2 = U_3 + U_4. \\ I = i_2 - i_1 = i_3 - i_4. \end{cases}$$

La résolution de ces équations est assez laborieuse. Elle exige le calcul d'un déterminant à 9 colonnes.

L'équation de condition qui donne la valeur des coefficients exponentiels est la suivante :

$$(3)\quad [2L_1^3(N - 2M) + 4ML_1^2L]\rho^3 + [(k_1 - k_2)L_1^2(N + 2M) + (4KM - 4k_1N)L_1^2]\rho^2 + [((2k_1^2 - k_1 - (k_2)^2)N - 4k_1k_2M)L_1 - ML(k_1 - k_2)^2]\rho + [k_1k_2(k_1 - k_2)(2M - N) - K(k_1 - k_2)^2M] = 0.$$

M et N ont les valeurs suivantes :

$$M = 2k_1k_2A + K(k_1 - k_2)U,$$
$$N = KA(k_1 - k_2).$$

Sous cette forme générale, la discussion de l'équation (3) serait extrêmement pénible.

On peut arriver à la simplifier en remarquant que, $k_1 - k_2$ devant être faible pour que la variation de I ne soit pas trop grande, on peut négliger les termes de degré au moins égal à deux en $(k_1 - k_2)$. De même K est en général très petit par rapport à k_1. Nous le négligerons vis-à-vis de k_1. En désignant par αk_1 la différence $k_1 - k_2$, l'équation de condition devient ainsi :

$$(4)\quad \rho(1 - \alpha)L_1^2(L - L_1)\rho^3 + [2K + k_1\alpha]L_1^2\rho^2 - 2k_1^2L_1(1 - 2\alpha)\rho + \alpha k_1^3 = 0.$$

Les conditions pour qu'une équation de la forme

$$a\rho^3 + b\rho^2 + c\rho + d = 0,$$

ait les parties réelles de ses racines négatives sont les suivantes :

$$\frac{b}{a} > 0; \qquad \frac{c}{a} > 0; \qquad \frac{d}{a} > 0.$$

Digitized by Google

Dans l'équation (4) c est toujours négatif; a, b et d doivent donc être également négatifs : On doit donc avoir :

$$\alpha < 0, \quad \text{c'est-à-dire} \quad k_2 > k_1,$$

$$L_1 < L.$$

Dans le cas où les moteurs fonctionneront en récupération, on aura ainsi nécessairement :

$$2K + k_1\alpha < 0.$$

Quand ils fonctionneront en moteurs, il faudra que l'on ait :

$$\text{module de} \quad \alpha > \frac{2K}{k}.$$

Cette condition sera toujours réalisée au démarrage, puisqu'alors $K = 0$.

Elle sera également facile à réaliser en cas de reprise sans qu'il soit nécessaire de donner à α une valeur bien grande, K étant petit par rapport à k_1.

La condition $k_2 > k_1$ pouvait être prévue d'après l'examen de la figure 11. Elle est nécessaire pour qu'en cas de récupération, l'intensité ne croisse pas en même temps que la différence de potentiel fournie par les moteurs, ce qui correspondrait à l'instabilité absolue.

Enfin pour réaliser la condition $L_1 < L$, il pourra être nécessaire de prendre certaines précautions; par exemple munir les machines du groupe régulateur de pôles pleins et d'amortisseurs et même, comme M. Boucherot l'a indiqué dans le but d'assurer à tous régimes une bonne commutation, compenser la réaction d'induit par un enroulement fixe réparti. Si cela ne suffit pas, il faudra ajouter une bobine de self induction dans le circuit des moteurs. Les conditions précédentes étant remplies, pour que les trois racines soient réelles, c'est-à-dire pour qu'il n'y ait pas d'oscillation à la mise en service, il faut que les coefficients de l'équation (4) remplissent la condition générale :

$$4\left(\frac{c}{a}\right)^3 + 27\left(\frac{d}{a}\right)^2 - \left(\frac{b}{a}\right)^2\left(\frac{c}{a}\right)^2 + 4\left(\frac{b}{a}\right)^3\left(\frac{d}{a}\right) - 18\left(\frac{b}{a}\right)\left(\frac{c}{a}\right)\left(\frac{d}{a}\right) < 0.$$

Il est difficile de préciser par le calcul quelles sont les conditions de détail que devront remplir les coefficients de l'équation (4) pour satisfaire à cette relation. Il semble toutefois qu'il faille éviter de donner au terme $4\left(\frac{c}{a}\right)^3$ une valeur prépondérante, ce qui peut se faire en augmentant, par les moyens indiqués plus haut, la prépon-

Digitized by Google

dérance de la self-inductance du circuit des moteurs sur celle du circuit de la régulatrice.

On peut conclure, en tous cas, qu'il est possible de réaliser la stabilité de marche, mais qu'il sera peut-être difficile d'éviter les oscillations amorties au moment de la mise en marche.

Lorsque $k_1 = k_2$, le degré de l'équation (4) s'abaisse au second et l'on vérifie aisément que le système est instable, comme nous l'avons indiqué plus haut, d'après des considérations simples.

NOTE ANNEXE IV

Détermination de la consommation d'énergie en l'absence de récupération sur une ligne métropolitaine.

I. — Bases de la détermination de la consommation d'énergie.

Des raisons diverses s'opposent à ce que l'énergie demandée par le service de traction puisse être déterminée d'une façon bien rigoureuse. Nous allons exposer quelques-unes de ces raisons.

Supposons tout d'abord un train de composition connue comportant par exemple deux motrices et trois remorques circulant sur une ligne parisienne. Le tonnage de ce train vide est une donnée précise et connue. Mais les conditions d'exploitation sont telles qu'il est absolument impossible de préciser exactement le tonnage des voyageurs transportés. On sait bien exactement le nombre des voyageurs qui ont pris des billets de telle heure à telle heure à chaque station. Il ne serait pas très difficile de faire pointer également le nombre des voyageurs qui ont utilisé à chaque station et à chaque instant des billets de carnet ou des coupons de retour de billets d'aller et retour. Mais le pointage des voyageurs de correspondance est une opération matériellement impossible d'une manière courante et qui ne peut être réalisée qu'exceptionnellement en y employant un grand nombre de personnes. On ne peut donc déterminer la charge des trains en voyageurs, qu'au moyen d'hypothèses basées sur des comptages faits au jugé à certains jours ou à certaines heures de la journée. Cette détermination comporte par suite une part d'imprécision très notable.

Supposons néanmoins parfaitement connue la charge d'un train et proposons-nous de déterminer la consommation d'énergie de ce train. En admettant que la tension aux bornes des moteurs soit bien

Digitized by Google

déterminée et connue, ce qui ne peut être réalisé qu'avec une certaine approximation, nous connaîtrons bien l'intensité du courant et la vitesse en chaque point du parcours. Mais d'autres éléments vont intervenir. Le personnel du mouvement arrive en général à régler suffisamment bien la marche des trains pour que l'intervalle entre deux départs successifs d'une même rame au terminus principal, soit constant à peu de chose près. Mais cette constance du temps de parcours n'est obtenue qu'aux dépens d'une variation notable de l'énergie dépensée, pour la raison suivante : le temps d'arrêt aux stations est très variable, suivant l'affluence. Il peut aller de quelques secondes à une minute environ dans certaines stations. Pour obtenir

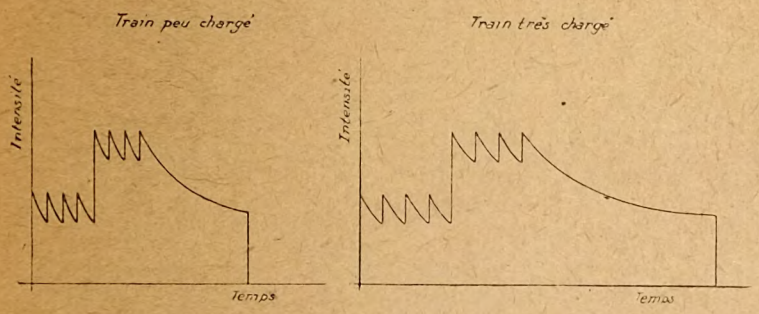


Fig. 17. — Consommations comparées de trains inégalement chargés.

la constance du temps de parcours, il faut donc faire varier la durée de marche entre stations.

A durée de marche égale entre deux stations, l'énergie demandée dépend évidemment de la charge du train. Le mécanisme d'appel de cette énergie à la source d'électricité se comprend aisément si l'on remarque que la tension étant supposée constante pour une même intensité du courant, l'accélération est en raison même du tonnage du train. Le démarrage étant réglé automatiquement, les courbes de l'intensité en fonction du temps pour deux trains inégalement chargés sont ainsi les suivantes : (fig. 17)

Non seulement pour le train le plus chargé la même intensité est prise pendant un temps plus grand, mais encore on doit prolonger le temps de marche sous courant de manière à compenser au moyen d'une vitesse finale un peu plus grande le temps plus grand demandé par la mise en vitesse.

Supposons maintenant deux trains de même tonnage, devant par-

Digitized by Google

courir le même intervalle entre stations dans des temps différents. Celui qui sera astreint au temps le plus court devra maintenir le courant plus longtemps, pour atteindre une vitesse de pleine marche plus élevée, d'où une augmentation de l'énergie demandée par ce train (fig. 18).

Comme il arrive fréquemment que le train qui doit faire le temps de parcours le plus réduit est en même temps le plus chargé, on voit que les deux causes qui précèdent interviennent souvent à la fois pour augmenter l'énergie demandée par les trains aux heures d'affluence.

On remarquera également qu'il n'y a aucune raison pour que

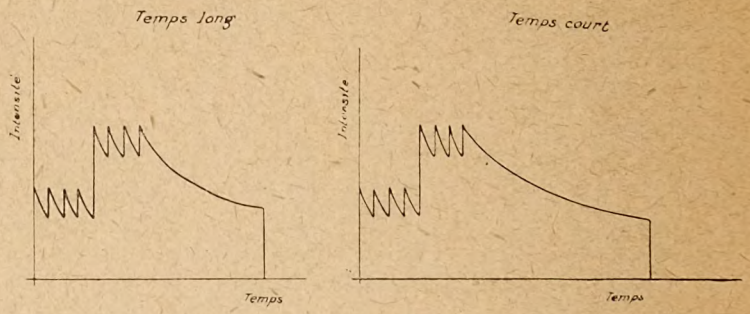


Fig. 18. — Consommations comparées pour des durées inégales de parcours.

l'énergie demandée par un train, soit proportionnelle à son tonnage. La loi de variation est certainement beaucoup plus compliquée et il est très probable qu'au delà d'une certaine affluence, l'énergie croit beaucoup plus vite que proportionnellement à la charge.

La notion de consommation spécifique perd, dans ces conditions toute précision. Il est nécessaire néanmoins de la conserver dans les calculs, car elle est seule à permettre de relier la consommation d'énergie à l'effort de traction nécessaire pour vaincre les différentes résistances qui s'opposent à la marche d'un train.

Aux causes d'imprécision qui précèdent s'ajoute l'habileté variable des machinistes. L'octroi de prismes à l'économie de consommation a fait beaucoup pour diminuer cette cause d'imprécision, chacun s'efforçant de tendre à la marche correspondant au minimum de consommation. Il y a néanmoins, des différences sensibles d'un machiniste à l'autre.

En résumé, toute étude sur la consommation d'énergie comporte

Digitized by Google

nécessairement une imprécision notable sur les tonnages des trains et les consommations spécifiques. On n'a donc pas à être surpris que les relevés de compteurs donnent des résultats souvent difficiles à interpréter, malgré les précautions prises pour l'étalonnage préalable des appareils, et que ces résultats s'écartent également d'une façon notable de ceux des calculs effectués en partant des données d'établissement de la ligne et du matériel roulant.

II. — Calcul de la consommation spécifique.

J'ai indiqué dans ma communication de novembre 1919 à la Société, la méthode à employer pour le calcul de la consommation spécifique.

Je crois utile d'entrer dans quelques détails sur la détermination des différents éléments de l'énergie mécanique et du rendement.

Les résistances passives comprennent :

La résistance au roulement en palier et alignement droit, la résistance positive ou négative due aux rampes et pentes, la résistance due aux courbes.

Voici comment chacune des énergies correspondant à ces diverses sources de résistances passives doivent être calculées :

III. — Détermination de la résistance au roulement.

On base parfois la connaissance de la résistance au roulement sur la notion de pente d'équilibre. Dans l'application de cette notion, il faut faire attention à différentes particularités.

L'équilibre d'un train sur une pente peut être vérifié de deux manières différentes :

Au repos, la pente d'équilibre est celle au delà de laquelle le train commencerait de lui-même à se mettre en mouvement.

En mouvement, la pente d'équilibre est celle sur laquelle le train courant sur son erre conserve une vitesse constante.

Ces deux manières de définir la pente d'équilibre sont aussi imprécises l'une que l'autre, pour les raisons suivantes : Le coefficient de frottement au repos n'est pas le même qu'en mouvement, par suite du jeu de la lubrification.

La résistance au mouvement varie avec la vitesse.

La pente d'équilibre utile à considérer est celle qui permet de déterminer le travail de traction dû à la résistance au mouvement. C'est donc la pente d'équilibre en mouvement, à une vitesse moyenne

Digitized by Google

qui serait très difficile à définir pour un train rapide de chemin de fer d'intérêt général, mais qu'on peut évaluer grossièrement pour un métropolitain, en raison de la faible importance relative de la résistance de l'air pour les vitesses ne dépassant pas 40 kilomètres à l'heure.

Mais une autre cause d'imprécision s'introduit dans l'application de la notion de pente d'équilibre, du fait de l'emploi, dans un même train, de motrices et de remorques.

La pente d'équilibre est généralement plus forte pour les motrices que pour les remorques.

Si l'on analyse les causes de cette différence, on constate qu'elle est due pour la plus grande part à l'énergie perdue dans les organes de transmission du travail moteur aux essieux. En général, on introduit cette énergie dans les calculs par l'intermédiaire du rendement du moteur qui en tient compte. Dans ces conditions, il n'est pas exact de définir le taux de l'effort résistant dû au roulement des motrices par la pente d'équilibre pendant les périodes de travail des moteurs. Il faut prendre comme valeur du rendement du moteur celle que l'on obtient en faisant abstraction des pertes dans la transmission par engrenages.

L'application de la notion de pente d'équilibre comporte, d'autre part, une difficulté d'ordre pratique qui n'est pas négligeable. L'enregistreur de vitesse parfait est encore à trouver. Il est pratiquement très difficile de constater sur un relevé d'enregistreur de vitesse si la courbe monte, descend ou reste en moyenne horizontale.

Il sera donc toujours assez difficile de vérifier l'exactitude des chiffres pris pour base de la résistance au roulement.

IV. — Énergie dépensée dans les rampes.

En désignant par p_R la rampe exprimée en millimètres par mètre, le travail dû à une rampe de longueur L a pour expression en watt-heures :

$$W_R = 0{,}00272\, p_R\, L.$$

Nous devrions normalement déduire de l'énergie dépensée celle que les pentes devraient permettre d'économiser et qui aurait la même expression que W_R, à la condition d'affecter W_R du signe moins. Mais si l'on analyse ce qui se passe pour un train en pente, on remarque que trois cas peuvent se présenter :

1° La pente est inférieure à la pente d'équilibre. On doit logi-

Digitized by Google

quement déduire dans ce cas l'énergie qu'elle permet bien réellement d'économiser.

2° La pente est supérieure à la pente d'équilibre et elle précède immédiatement un point de ralentissement ou d'arrêt. Il est nécessaire de freiner. La pente ne permet donc aucune économie d'énergie ; il n'y a pas à en tenir compte, mais il ne faut pas compter non plus l'énergie due à la résistance au roulement et aux courbes pendant le passage du train sur la pente.

3° La pente est supérieure à la pente d'équilibre, mais elle n'est pas assez longue pour nécessiter un freinage et elle est suivie d'un palier ou d'une rampe assez longues pour absorber l'énergie vive procurée au train par la pente. Dans ce cas, on peut encore ne pas tenir compte de l'énergie économisée par la pente, mais à la condition de compter pour zéro non seulement, comme dans le cas précédent, l'énergie absorbée par la résistance au roulement et par les courbes pendant le passage en pente, mais encore l'énergie due aux mêmes causes pendant le parcours de toute la partie du palier ou de la rampe où, profitant de l'énergie vive due à la pente, on n'aura pas besoin de mettre en action l'effort moteur. La longueur de ce parcours peut se déterminer approximativement sans grandes difficultés.

Dans tous les cas, la déduction de l'énergie économisée par les pentes se fera donc indirectement par une réduction de la longueur à laquelle s'applique l'effort de traction dû au roulement aux courbes ou aux rampes.

V. — Energie dépensée dans les courbes.

L'énergie due au passage en courbe sera calculée d'après la formule usuelle donnant l'effort de traction par tonne $Pk = \frac{500e}{R}$, e étant l'écartement des rails, soit 1,44 dans le cas des métropolitains parisiens. On aura encore $Wk = 0{,}00272\ Pk\ L$, la longueur L étant déterminée en tenant compte des considérations qui précèdent.

VI. — Détermination de l'énergie vive.

L'évaluation de l'énergie vive consommée par tonne de train comporte une seule grandeur à déterminer : c'est la vitesse au moment du freinage.

Ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte d'après les consi-

Digitized by Google

dérations développées au début de cette note, cet élément est celui qui influe le plus sur les écarts de consommation que l'on peut constater sur un même train et un même parcours. On peut limiter l'indétermination d'après les remarques suivantes :

Si le temps de parcours était réduit au strict minimum, le machiniste devrait freiner à la vitesse maxima permise par les conditions du profil. Dans ces conditions, la consommation d'énergie pour un équipement sans récupération serait considérable.

Mais, quel que soit l'intérêt qu'il y a pour l'exploitant à utiliser au plein le matériel disponible, aucune exploitation régulière ne serait possible d'après une pareille donnée. On est obligé, pour de multiples raisons, de laisser une marge assez importante dans l'horaire. C'est cette marge qui permet de distinguer les machinistes suivant leur aptitude à réduire la consommation d'énergie et de leur allouer en conséquence une prime dite d'économie.

Il est facile de prévoir les manœuvres par lesquelles les machinistes chercheront à augmenter leur prime :

Ils ont d'abord visiblement intérêt à courir sur l'erre le plus possible, en coupant le courant sitôt le train lancé et assuré de gagner la prochaine station et à freiner à une vitesse aussi réduite que possible. On peut penser également qu'ils chercheront, pendant la course sur l'erre, à franchir les points de ralentissement obligés telles que les entrées en courbe, à la vitesse permise par le règlement, ceci afin d'éviter le freinage correspondant à une perte de courant considérable, suivis d'une reprise de courant également onéreuse puisqu'elle s'effectue dans de mauvaises conditions de rendement.

Ce qui empêche les machinistes de pousser trop loin cette tactique, c'est qu'il est nécessaire de maintenir le temps de parcours dans les limites de l'horaire imposé.

Il en résulte que certaines règles moyennes ont pu être établies pour la conduite des trains et qu'on peut se baser sur ces règles pour déterminer la consommation normale d'énergie.

En général, quand la station n'est pas précédée d'une rampe qui permet au train d'absorber naturellement son énergie vive, ou d'une pente qui oblige à freiner sur un parcours allongé, le freinage s'effectue toujours dans des conditions identiques, c'est-à-dire les stations étant normalement en palier, sur un parcours toujours le même et avec la même retardation. Dans ce but, le machiniste cherche à aborder la station à une vitesse toujours la même et telle qu'il commence le freinage en un point situé à une distance fixe du

Digitized by Google

point d'arrêt. Il commencera par exemple à freiner à partir du milieu de la station, marqué par le bureau du chef avec une retardation de 0,80 par seconde. Le parcours à faire, qui est de 35 mètres environ, correspond ainsi à une vitesse au début du freinage de 27 kilomètres à l'heure ou 7 m 50 par seconde.

Ce sont ces données que l'on peut adopter pour les freinages normaux.

Pour ceux qui devront s'effectuer à partir d'une vitesse moindre, on peut prendre uniformément la moitié de la vitesse précédente. Ce choix est évidemment arbitraire ; mais l'erreur sur les freinages à faible vitesse est sans grande importance sur le résultat final, l'énergie variant en effet comme le carré de la vitesse devient relativement très faible pour les vitesses de l'ordre de 10 à 15 kilomètres à l'heure.

VII. — Conditions particulières influant sur la consommation d'énergie.

Les considérations qui précèdent permettent dans un grand nombre de cas de déterminer les différents éléments de l'énergie mécanique demandée par un train. Elles doivent toutefois être complétées par des règles spéciales pour les parties les plus accidentées du tracé et du profil, où certaines limitations de vitesse se trouvent imposées. Nous allons indiquer sur quelles considérations ces règles peuvent être basées :

Les conditions de marche d'un train sur une ligne métropolitaine sont déterminées par différentes règles que nous allons exposer :

En premier lieu, bien que les signaux doivent indiquer si une section est libre de tout train, il est toujours indispensable que le machiniste soit en mesure de s'arrêter en présence d'un obstacle imprévu. Il faut donc que la distance de freinage soit inférieure à la distance de visibilité en courbe.

La vitesse dans les courbes est ainsi limitée en fonction de la puissance des freins. Elle l'est également par la considération de l'effet de la force centrifuge, lequel est lié au dévers adopté.

Nous avons cru intéressant de rapprocher les résultats obtenus en tenant compte de ces diverses considérations des prescriptions du service du contrôle pour les limites de vitesse dans les courbes.

La puissance des freins peut être définie par l'application de la règle administrative dite des trois vingts : arrêt obtenu sur un parcours de 20 m sur une pente de 20 mm par mètre à la vitesse de 20 km/h.

Digitized by Google

On déduit en effet de l'observation de ces conditions l'accélération g et la durée t du freinage, ainsi que l'effort retardateur par tonne f dû à l'application des freins.

Ces différents éléments sont liés par les relations suivantes :

$$1,1g = \left(\frac{f+6-20}{1000}\right) \times 9,81,$$

$$\frac{1}{2} gt^2 = 20,$$

$$\frac{20000}{3600} = gt.$$

D'où :

$$f = 102 \ kg/tonne.$$

$$g = 0,775 \ m.sec : sec.$$

$$t = 7,2 \text{ secondes.}$$

On peut admettre que les freinages sont tous réalisés avec le même effort retardateur. On peut donc déterminer dans toutes les conditions de tracé et de profil l'espace couru pendant le freinage.

D'autre part, M. Gadot, Ingénieur en Chef des Services de la Voie à l'Omnium Lyonnais, a établi en 1908 un abaque qui permet de déterminer la vitesse optima en courbe en fonction du dévers et du rayon de la courbe.

Nous résumons dans le tableau suivant les résultats obtenus pour les Métropolitains parisiens en tenant compte de ces diverses considérations.

DISTANCE DE FREINAGE ET DE VISIBILITÉ.

PROFIL ET TRACÉ	Vitesse imposée par le contrôle Km/h.	Dévers pour la vitesse imposée d'après M. Gadot cm.	Vitesse pour dévers moyen de 12 cm. d'après M. Gadot Km/h.	Distance de visibilité m.	Distance de freinage pour la vitesse imposée m.
Alignement — palier . .	45	»	»	»	83
Alignement pente entre 20 et 30 mm/m	35	»	»	»	70
Alignement — pente supérieure à 30 mm/m . . .	30	»	»	»	58,50
Courbe de 200	30	5,4	45	46	52,50
Courbe de 150	20	3,2	39	41	22.70
Courbe de 100	20	4,8	32	34,50	14,60
Courbe de 50.	20	9,5	22	24	13,80

Digitized by Google

VIII. — Evaluation du rendement.

Le rendement moyen ηd pendant la période de démarrage peut être calculé de la manière suivante, d'après la figure de la communication de novembre 1919.

Soit K_1, le coefficient angulaire de la droite O A, K_2 le coefficient angulaire de la droite BA_2, p_1 les pertes à vide OB.

La puissance utile au temps t après le début du démarrage a pour valeur :

$$P_u = K_1 t$$

La puissance fournie aux moteurs :

$$P_m = K_2 t + p_1.$$

En désignant par t_1 le temps du passage en parallèle, par t_2 le temps de la suppression de la dernière résistance en parallèle, la puissance demandée au réseau en parallèle a pour valeur :

$$P_2 = K_2 t_2 + p_1.$$

La puissance demandée au réseau en série :

$$P_1 = \frac{P_2}{2} = \frac{K_2 t_2 + p_1}{2} = K_2 t_1 + p_1,$$

d'où :

$$t_1 = \frac{t_2}{2} - \frac{p_1}{2k_2}.$$

L'énergie utile pendant la période de marche sur résistance a pour valeur :

$$W_u = \frac{K_1 t_2^2}{2}$$

L'énergie absorbée pendant la marche en série a pour valeur :

$$W_1 = P_1 t_1 = \frac{P_2 t_1}{2}.$$

L'énergie absorbée pendant la marche en parallèle a pour valeur :

$$W_2 = P_2 (t_2 - t_1)$$

L'énergie totale absorbée :

$$W_1 + W_2 = P_2\left(t_2 - \frac{t_1}{2}\right) = (K_2 t_2 + p_1)\left(3\,\frac{t_2}{4} + \frac{p_1}{4K_2}\right),$$

P_1 peut être exprimé en fonction du rapport λ des pertes variables aux pertes fixes à pleine charge et pleine tension. On a :

$$\lambda p_1 = (K_2 - K_1) t_2$$

d'où :

$$W_1 + W_2 = \left(K_2 + \frac{K_2 - K_1}{\lambda}\right)\left(\frac{3}{4} + \frac{K_2 - K_1}{4\lambda K_2}\right) t_2^2,$$

Digitized by Google

et :

$$\rho_d = \frac{W_u}{W_1 + W_2} = \frac{2K_1}{\left(K_2 + \frac{K_2 - K_1}{\lambda}\right)\left(3 + \frac{K_2 - K_1}{\lambda K_2}\right)},$$

$$K_2 = \frac{2\lambda K_1}{\left(1 + \lambda - \frac{K_1}{K_2}\right)\left(3\lambda + 1 - \frac{K_1}{K_2}\right)}.$$

On peut établir une relation entre p_1 et le rendement ρ_m des moteurs Les pertes à pleine charge ont en effet pour valeur :

$$p_1(1 + \lambda).$$

D'où le rendement :

$$\rho_m = \frac{K_1 I_2}{K_1 I_2 + p_1(1 + \lambda)} = \frac{K_1}{K_1 + \frac{K_2 - K_1}{\lambda}}(1 + \lambda).$$

On en déduit l'expression suivante du rapport

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{1 + \lambda}{1 + \frac{\lambda}{\rho_m}}.$$

On peut donc écrire :

$$\rho_d = \frac{2\lambda(1 + \lambda)}{\left(1 + \frac{\lambda}{\rho_m}\right)\left(\lambda + 1 - \frac{1 + \lambda}{1 + \frac{\lambda}{\rho_m}}\right)\left(3 + 1 - \frac{1 + \lambda}{1 + \frac{\lambda}{\rho_m}}\right)}$$

$$= \frac{2\lambda(1 + \lambda)\left(1 + \frac{\lambda}{\rho_m}\right)}{\frac{\lambda}{\rho_m}(\lambda + 1)\left[2\lambda + (3\lambda + 1)\frac{\lambda}{\rho_m}\right]} = \frac{2\rho_m(1 + \lambda)\left(1 + \frac{\lambda}{\rho_m}\right)}{\lambda(\lambda + 1)\left[2 + \frac{3\lambda + 1}{\rho_m}\right]}.$$

Pour $\lambda = 1$, condition voisine de la réalité, on a :

$$\rho_d = \frac{\rho_m(1 + \rho_m)}{2 + \rho_m}.$$

On peut faire un calcul analogue pour déterminer le rendement ρ_d pendant le démarrage sur résistances en série seulement.

On a dans ce cas :

$$W_u = K_1 \frac{t_1^2}{2} = \frac{K_1}{8}\left[1 - \frac{1 - \frac{K_1}{K_2}}{\lambda}\right]^2 t_2^2.$$

$$W_1 = P_1 t_1 = (K_2 t_1 + p_1) t_1 = \frac{K_2}{4}\left[1 - \frac{\left(1 - \frac{K_1}{K_2}\right)^2}{\lambda^2}\right] t_2^2,$$

Digitized by Google

d'où :

$$\rho'_d = \frac{W_u}{W_1} = \frac{K_1}{2K_2} \frac{1 - \dfrac{1 - \dfrac{K_1}{K_2}}{\lambda}}{1 + \dfrac{1 - \dfrac{K_1}{K_2}}{\lambda}}$$

$$\rho'_d = \frac{1+\lambda}{2\left(1+\dfrac{\lambda}{\rho_m}\right)} \frac{\lambda - 1 + \dfrac{1+\lambda}{1+\dfrac{\lambda}{\rho_m}}}{\lambda + 1 - \dfrac{1+\lambda}{1+\dfrac{\lambda}{\rho_m}}} = \frac{\rho_m + \dfrac{\lambda - 1}{2}}{1 + \dfrac{\lambda}{\rho_m}}.$$

Pour $\lambda = 1$:

$$\rho'_d = \frac{\rho_m^2}{\rho_m + 1}.$$

Dans la communication de novembre 1919 nous sommes arrivés à la détermination du rendement moyen ρ qui a pour expression :

$$\rho = \frac{W_u}{\dfrac{W_d}{\rho_d} + \dfrac{W_u - W_d}{\rho_m}}.$$

Dans l'application, c'est de l'inverse de ce rendement que nous aurons besoin. Nous écrivons donc la relation précédente sous la forme :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_m} + \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_m}\right) \frac{W_d}{W_u}.$$

Ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, nous devons prendre pour le rendement ρ_m celui du moteur sans engrenages. Si, par exemple :

$$\rho_m = 0{,}91,$$

l'application des formules précédentes nous donne ainsi :

Pour le démarrage en parallèle :

$$\rho_d = 0{,}595,$$

$$\frac{1}{\rho} = 1{,}1 + 0{,}58 \frac{W_d}{W_u}.$$

Pour le démarrage en série :

$$\rho_d = 0{,}433,$$

$$\frac{1}{\rho} = 1{,}1 + 1{,}21 \frac{W_d}{W_u},$$

W_d peut être calculé d'après la vitesse correspondant en fin de démarrage sur résistances à l'intensité moyenne pendant cette

Digitized by Google

période. Si cette vitesse est 27 kilomètres à l'heure pour le démarrage en parallèle et sensiblement la moitié pour le démarrage en série, soit respectivement 7,50 et 3,75 mètres par seconde, on a donc, par application d'une formule établie plus haut :

Pour le démarrage en parallèle:

$$W_d = 0{,}139 \times 1{,}1 \times \overline{7{,}5^2} = 8{,}6 \text{ watt-heures.}$$

Pour le démarrage en série :

$$W_d = 0{,}139 \times 1{,}1 \times \overline{3{,}75^2} = 2{,}15 \text{ watt-heures.}$$

Par suite l'inverse du rendement moyen a pour valeur :

Pour le démarrage en parallèle :

$$\frac{1}{\rho} = 1{,}1 + \frac{5}{W_u}$$

Pour le démarrage en série :

$$\frac{1}{\rho} = 1{,}1 + \frac{2{,}6}{W_u}.$$

On peut représenter cette expression par des abaques qui permettent de passer immédiatement de l'énergie utile W_u à l'énergie électrique $\frac{W_u}{\rho}$ demandée par la traction.

IX. — Résumé du calcul de la consommation d'énergie.

En résumé le calcul se poursuivra de la manière suivante :

Pour chaque interstation de longueur l, on déterminera d'après les considérations qui précèdent :

1° La longueur l_n d'application de l'effort normal P_n en palier et alignement droit, d'où l'on déduira l'énergie par tonne :

$$W_n = 0{,}00272 P_n l_n.$$

2° Les longueurs l_{R_1}, l_{R_2}, ... d'application des efforts en rampes P_{R_1}, P_{R_2}, ..., d'où l'on déduira l'énergie par tonne :

$$W_r = 0{,}00272 [P_{R_1} l_{R_1} + P_{R_2} l_{R_2} + \cdots].$$

3° Les longueurs l_{K_1}, l_{K_2}, . d'application des efforts en courbes P_{K_1}, P_{K_2}, ... d'où l'on déduira l'énergie par tonne :

$$W_k = 0{,}00272 [P_{K_1} l_{K_1} + P_{K_2} l_{K_2} + \cdots].$$

4° L'énergie W_a égale à

$$0{,}139 \times 1{,}1 \times \overline{7{,}5^2} \qquad \text{ou à} \qquad 0{,}139 \times 1{,}1 \times \overline{3{,}75^2}$$

suivant que le freinage est normal ou à vitesse réduite.

5° L'énergie W_u somme des précédentes :

$$W_u = W_n + W_r + W_k + W_a.$$

Digitized by Google

6°. L'énergie électrique fournie :

$$W = \frac{W_u}{\rho},$$

d'après l'une des formules :

$$\frac{1}{\rho} = 1{,}1 + \frac{5}{W_u} \quad \text{pour le démarrage en parallèle,}$$

$$\frac{1}{\rho} = 1{,}1 + \frac{2{,}6}{W_u} \quad \text{pour le démarrage en série,}$$

ou les abaques correspondants.

7° L'énergie électrique pour l'éclairage et les compresseurs évaluée à w watt-heures par tonne kilométrique.

L'énergie électrique totale fournie à une tonne de train pour le parcours de longueur l kilomètres sera ainsi

$$W + wl.$$

X. — Application de la méthode précédente. — Tonnage moyen

Nous avons appliqué les considérations qui précèdent à une ligne déterminée. Elles nous ont conduit pour chaque interstation et pour pour chaque sens à une consommation d'énergie électrique, exprimée en watt-heures par tonne de train. Les essais effectués en ligne nous fournissent pour les mêmes interstations une consommation d'énergie en watt-heures par train. Le quotient de ce deuxième chiffre par celui résultant du calcul, donne un tonnage de train qui serait le tonnage réel si les deux chiffres étaient exacts. Par suite des inexactitudes résultant, d'une part des approximations contenues dans les hypothèses ayant servi de bases au calcul, d'autre part des imprécisions des lectures de compteurs au cours des essais, le tonnage déterminé comme il est indiqué ci-dessus n'est qu'approché, parfois assez grossièrement.

Dans certains cas il est vraisemblable, dans d'autres cas il est manifestement ou trop faible ou trop fort. Si les conditions de tracé ou de profil de l'interstation considérée sont telles qu'une erreur de calcul soit peu vraisemblable, on peut penser à une erreur ou à une imprécision de lecture des compteurs, dont on s'aperçoit en général à ce que les chiffres de consommation d'énergie sur des interstations successives pèchent les unes par excès, les autres par défaut.

Il y a au contraire des cas où une certaine indécision règne sur les hypothèses du calcul. C'est ce qui arrive particulièrement pour cer-

Digitized by Google

taines interstations en fond de bateau avec courbes. Dans ce cas, le rapprochement des chiffres permet de rectifier les hypothèses prises pour bases du calcul.

On peut ainsi arriver à déterminer avec une certaine approximation un tonnage moyen pour chaque partie du parcours, et avec une approximation notablement plus grande, le tonnage moyen pour le parcours complet aller et retour de la ligne.

Digitized by Google

LE PROBLÈME DE LA SÉCURITE DANS LES CHEMINS DE FER

par M. Lemonnier.

Ingénieur aux chemins de fer de l'Etat (1)

L'auteur définit le problème de la sécurité et expose les procédés employés : pour espacer les trains (block non enclanché, block enclanché, block à circuit de voie) ; pour éviter les rencontres (livret de marche, block system) ; pour éviter les prises en écharpe au passage des bifurcations (sauts de mouton, signaux indicateurs de direction, disques, sémaphores, poteaux limites de protection) ; il donne un aperçu sur la constitution des postes d'aiguilleurs, sur l'emploi des crocodiles et sur le contrôle automatique des trains. Il termine par des renseignements statistiques d'où il ressort que le nombre des victimes des accidents de chemins de fer est extrêmement réduit.

L'étude du problème de la sécurité, c'est la recherche des moyens propres à éviter les accidents. Nous laisserons de côté, les accidents « Voie » et « Traction », qui résultent de la rupture d'un rail, de l'écroulement d'un pont, de la rupture d'un essieu, d'une explosion de chaudière, d'un dérangement des freins, etc... Les moyens employés pour prévenir de tels accidents ne se rattachent en effet en aucune façon à vos préoccupations habituelles et nous nous en tiendrons aux accidents « Exploitation », c'est-à-dire aux rencontres d'un train avec un obstacle, le plus habituellement formé par un autre train.

Un moyen suffisant pour éviter toute collision consisterait évidemment à imposer à toutes les circulations la *marche à vue*. Si les trains ne dépassaient jamais une vitesse telle qu'ils puissent à un instant quelconque s'arrêter dans la partie de voie qu'ils aperçoivent devant eux, toute autre réglementation deviendrait inutile. C'est d'ailleurs avec ce système que fonctionnent la plupart des tramways.

On aperçoit immédiatement l'impossibilité d'exploiter les grands réseaux avec ce procédé. Leurs trains atteignent de telles masses et de telles vitesses qu'il leur faut, pour obtenir l'arrêt, disposer d'une distance qui atteint dans certains cas l'ordre de grandeur de 1 000 mètres. Or la nuit, ou même le jour dans les courbes, la longueur de la partie de voie *en vue* est souvent très inférieure à ce chiffre. Elle peut même

(1) En présentant ce rapport à la 4e Section du Comité, M. Lemonnier a tenu à faire remarquer qu'il parlait exclusivement en son nom personnel et qu'il n'avait reçu aucun mandat, ni de son réseau, ni des autres réseaux français.

Digitized by Google

devenir nulle dans les souterrains ou en temps de brouillard. Nous sommes donc conduits à employer d'autres procédés qui comportent normalement l'usage de signaux d'arrêt absolu (sémaphore ou signaux carrés à damier rouge et blanc) placés au point où le train doit être éventuellement arrêté, *précédés, à une distance de* 1 000 *mètres environ, d'un premier signal* (le plus souvent damier vert et blanc) renseignant le mécanicien en temps utile pour lui permettre de respecter les indications du signal d'arrêt absolu qu'il va rencontrer.

Les collisions entre les trains peuvent se classer en trois catégories. Un train peut en effet : rattraper un autre train de même sens — rencontrer un train de sens contraire — prendre un autre train en écharpe à une bifurcation ou à tout autre point analogue. Nous sommes donc amenés naturellement à diviser notre étude en trois parties :

1° Espacement des trains de même sens;

2° Moyens d'éviter les rencontres;

3° Protection des bifurcations.

I. — Espacement des trains.

L'espacement des trains de même sens est évidemment le problème le plus général, puisqu'il se pose partout, sur la voie unique comme sur la double voie. Il peut être résolu de deux manières très différentes, en maintenant entre deux trains consécutifs soit un certain *temps*, soit une certaine *distance*. Ce dernier système se désigne habituellement sous le nom de cantonnement, de block system, ou plus simplement encore sous le nom de block.

Espacement par le temps.

Je ne dirai qu'un mot de l'espacement par le temps, d'une part parce que ce système tend à disparaître, du moins sur les lignes chargées, d'autre part parce que son application ne conduit à aucun dispositif matériel dont l'étude puisse vous intéresser.

Dans ce système, un poste peut, après le passage d'un premier train, en expédier un second après un certain temps — habituellement dix minutes — sans avoir à se préoccuper de la situation du premier train à ce moment. Si ce premier train s'est arrêté en pleine voie, c'est-à-dire en un point non muni de signaux, le conducteur d'arrière doit *dès l'arrêt, protéger* ce train, c'est-à-dire se porter au pas de course vers l'arrière, jusqu'à une distance, fixée à 1 000 mètres sur la plu-

Digitized by Google

part des réseaux, et faire en ce point des signaux d'arrêt (drapeau rouge ou feu rouge, appuyés de pétards) qui, faits à cette distance, sont suffisants pour arrêter en temps utile tout train survenant.

Les inconvénients de ce système sont les suivants : si le conducteur ne part pas *immédiatement* à la protection, si les trains suivent une marche différente de la marche prévue, en particulier si le premier a perdu du temps avant de s'arrêter, le conducteur d'arrière, allant à la protection, pourra rencontrer le second train avant d'avoir pu parcourir les 1 000 mètres prévus, et le second train, prévenu trop tard, pourra tamponner le premier. Aussi ce système a-t-il disparu sur toutes les lignes de quelque importance, sur lesquelles on utilise toujours le cantonnement ou block-system.

Block-system.

Dans tous les systèmes de block, la ligne est divisée en un certain nombre de cantons. L'entrée de chacun d'entre eux est défendue par un signal (habituellement un sémaphore annoncé par un damier vert et blanc), qui est fermé au passage de chaque train et qui n'est remis à la voie libre qu'au moment où le train a dépassé le signal d'entrée du canton suivant, et a été couvert par la fermeture de ce signal.

Les avantages du système sont évidents.

D'une part, il permet d'augmenter considérablement le débit de la ligne, à la condition toutefois que les postes soient suffisamment rapprochés, puisque le temps auquel peuvent se suivre deux trains est réduit au nombre de minutes qu'ils mettent à parcourir un canton.

D'autre part et surtout, le block constitue une solution théorique parfaite du problème de l'espacement, puisque, *quelle que soit la marche effective d'un train*, ce train est protégé par le signal d'entrée du canton, qui reste fermé derrière lui. Il est donc possible avec ce système de supprimer la protection par les soins du conducteur d'arrière dans les conditions indiquées plus haut.

En fait, cette protection a été conservée, à titre de surcroît de précaution, sur la plupart des lignes munies du block; elle a par contre été supprimée complètement sur les blocks modernes, de fonctionnement excellent, dont nous parlerons tout à l'heure.

Je laisse de côté complètement la question très délicate de la *réglementation* du block-system, qui peut être « permissif » ou « absolu », suivant qu'on admet, ou non, la pénétration, sous certaines conditions dans un canton occupé, ou du moins dans un canton dont la li-

Digitized by Google

bération n'est pas certaine, en cas de dérangement des appareils, par exemple. Et, sans entrer dans les détails de construction des divers appareils, je vais seulement en indiquer le principe.

Block non enclenché.

Dans ce genre d'appareils, qui n'est plus maintenant représenté en France que par le cantonnement téléphonique, il n'existe aucune liaison entre les appareils de block proprement dits (le téléphone dans la circonstance) et les signaux. Rien n'oblige un garde à attendre la reddition de voie libre faite au téléphone, pour rouvrir ses signaux après le passage d'un train. C'est donc un block purement moral, et il y a évidemment intérêt à le remplacer par un système plus perfectionné.

Block enclenché à circulations non intéressées.

Dans ce block, qui est au contraire encore très usité, le signal d'entrée de chaque canton est enclenché dans sa position fermée dès sa fermeture, après le passage de chaque train, et il ne peut être remis à la voie libre qu'après avoir été *débloqué* par le poste suivant; ce poste ne peut lui-même procéder au déblocage qu'après la fermeture de son propre signal après le passage du train.

Les avantages sur le block non enclenché sont considérables. Mais il subsiste néanmoins dans ces types d'appareils un gros inconvénient. Rien n'y empêche matériellement un garde de fermer par erreur son signal et de débloquer le poste amont *avant* le passage d'un train. Il fallait donc faire un pas de plus.

Block enclenché avec circulations intéressées.

Dans ce block, qui est également très largement représenté en France, les circulations elles-mêmes interviennent, en ce sens qu'un poste de sortie ne peut pas matériellement rendre voie libre au poste d'entrée sans qu'une pédale, placée à la sortie du canton, ait été actionnée par une circulation.

Ces appareils constituent incontestablement un progrès; mais ils donnent encore lieu à la critique suivante. Si un train subit dans un canton une rupture d'attelage, la pédale de sortie du canton est actionnée par le passage de la première partie du train, et il devient ma-

Digitized by Google

tériellement possible au garde de rendre voie libre, bien que le canton soit encore occupé par la partie rompue. C'est pourquoi les réglementations de block comportent toutes l'obligation pour le poste de sortie, de ne rendre voie libre qu'après avoir constaté par l'observation du signal de queue, que le train est bien complet. Mais malheureusement, cette prescription, pourtant très importante, reste purement morale dans tous les types de blocks que nous venons d'examiner.

D'autre part, les blocks à pédale, dont l'installation est assez facile en ce qui concerne la pleine voie, donnent lieu dans les gares à un certain nombre de difficultés, en ce qui concerne l'exécution des manœuvres et des garages. On a donc encore été conduit à aller plus loin, et on a étudié des blocks à *circuit de voie*, qui donnent une solution théorique complète du problème. Le block à circuit de voie est le plus habituellement automatique.

Block automatique à circuit de voie.

Dans ce block, le relais d'un sémaphore (relais dont les contacts « haut » ferment le circuit d'ouverture du sémaphore) est excité par une source électrique, continue ou alternative, placée à la sortie du canton, et dont le courant lui parvient *par les rails* de la voie, munis des connexions électriques et des joints isolants nécessaires. Tant que le canton est libre, le relais est excité, et le sémaphore ouvert. Mais si la voie est occupée, ne fût-ce que par un seul véhicule, les essieux de ce véhicule réunissent électriquement les deux rails, font par conséquent baisser la tension aux bornes du relais et provoquent sa désexcitation, c'est-à-dire la fermeture du signal. Avec ces appareils, c'est donc la présence même d'un véhicule sur la voie qui maintient le signal à l'arrêt. C'est la solution parfaite du problème du block, si les appareils fonctionnent bien.

Mais ceci est indispensable. La tendance actuelle des grands réseaux est en effet de supprimer, sur les lignes munies de ce type d'appareils, toute autre protection que celle qu'ils fournissent. Il est donc nécessaire que cette protection ne fasse jamais défaut. Si habiles que soient les constructeurs, nous ne pouvons pas espérer qu'ils nous fournissent des appareils n'ayant *jamais* un raté. Il ne paraît en particulier guère possible de n'avoir jamais d'interruption accidentelle de certains circuits, à la suite de fusion de fusibles, de rupture de fil, de rupture de vases de piles, par exemple. Nous pouvons admettre, à la condition qu'ils ne soient pas trop fréquents (car alors ils désorganiseraient

Digitized by Google

notre service), des ratés se traduisant par le maintien intempestif à l'arrêt d'un signal qui devrait être ouvert; mais il est nécessaire qu'un raté ne se traduise jamais par le maintien intempestif à l'ouverture d'un signal qui devrait être fermé. C'est sur ce point que les constructeurs doivent, par dessus tout, faire porter leurs efforts. Je sortirais du cadre que je me suis imposé si j'examinais en détail les moyens à employer pour obtenir le résultat cherché. Je signalerai seulement les points suivants, qui sont parmi les plus importants.

Il faut, avant tout, des relais parfaits, dans lesquels ne puisse se produire, quand ils sont désexcités, aucun maintien anormal des contacts « haut », soit par coincement mécanique de la partie mobile, soit par soudure des contacts, soit par toute autre cause. Il faut, d'autre part, que ces relais se désexcitent franchement, même sous l'action d'un shunt médiocre, comme celui que donne parfois un seul véhicule sur la voie.

Il faut, d'autre part, que toutes dispositions soient prises pour que, le circuit de voie étant shunté, et le relais n'étant par conséquent pas excité par sa source normale d'excitation, il ne puisse l'être anormalement, malgré la présence du shunt, par une autre source, par suite de mélanges de fils par exemple, ou parce que les joints isolants d'extrémité du circuit de voie seraient en mauvais état et devenus conducteurs.

Il faut enfin que le relais étant désexcité, et par conséquent ses contacts « haut » coupés, le signal soit certainement à l'arrêt. Les signaux mécaniques se ferment habituellement sous l'action de la seule pesanteur; il faut donc éviter les divers coincements qui peuvent se produire, soit dans le moteur, soit dans la transmission entre le moteur et le signal, soit sur l'axe du signal, en particulier en cas de gelée. Notons ici que cette dernière partie du problème se trouve résolue de la façon la plus efficace par l'emploi des signaux lumineux de jour et de nuit qui ne comportent aucune partie mobile, mais seulement l'usage, le jour comme la nuit, des feux donnés habituellement pendant la nuit par les signaux ordinaires.

A cet avantage primordial, les signaux lumineux joignent celui, extrêmement important aussi, de simplifier considérablement la tâche des mécaniciens, en permettant de ne présenter à ces agents à un instant déterminé que la seule indication nécessaire à cet instant, tandis qu'en signalisation mécanique, nous présentons fréquemment aux mécaniciens simultanément un groupe de plusieurs signaux, entre les

Digitized by Google

indications desquelles ils doivent choisir la plus impérative. On comprend donc pourquoi, malgré leur prix élevé, ces signaux sont actuellement très en faveur, et que beaucoup de réseaux étudient actuellement leur application aussi étendue que possible.

II. — MOYENS D'ÉVITER LES RENCONTRES DE TRAINS DE SENS CONTRAIRES.

Le plus sûr moyen d'empêcher deux trains de sens contraires de se rencontrer, est évidemment d'affecter une voie distincte à la circulation des trains de chaque sens. C'est le régime de la *double voie* qui est d'autant plus avantageux qu'il améliore le débit de la ligne en même temps que la sécurité.

Malheureusement, il n'est évidemment pas possible, pour des raisons budgétaires, d'établir à double voie toutes les lignes, et il a été nécessaire de maintenir *en voie unique* un grand nombre de lignes, d'ailleurs pour la plupart assez peu chargées.

Les grands réseaux français emploient habituellement, pour éviter la rencontre de deux trains de sens contraires sur la voie unique, la méthode que l'on peut appeler le *respect du livret de marche*, et qui consiste à déterminer d'avance pour toutes les circulations, les points de croisement et de garage. Ces points sont portés par le livret de marche à la connaissance de tous les intéressés, et quand ils sont respectés, aucune formalité particulière n'est imposée pour l'expédition d'un train. Le règlement fixe au contraire avec les plus grands détails, qui ne sauraient trouver place ici, les précautions à prendre quand on est amené à modifier exceptionnellement ces points de croisement ou de garage, soit en cas de retard, soit quand on doit mettre en marche des circulations autres que les trains réguliers, par exemple des trains facultatifs, extraordinaires, dédoublements, trains de service ou de matériaux, machines de secours.

Sur beaucoup de lignes à voie unique, on se contente de ce système, souvent complété toutefois par l'emploi de cloches électriques servant à annoncer les circulations avant leur départ de chaque gare, à la gare vers laquelle elles se dirigent ainsi qu'à divers points intermédiaires de la ligne.

Sur certaines lignes toutefois, on utilise le block-system, à l'aide d'appareils de block analogues à ceux de la double voie (c'est-à-dire ne permettant l'ouverture d'un sémaphore quelconque que si le train précédent a dépassé le sémaphore suivant), complétés par un dispositif tel que l'ouverture d'un sémaphore de départ de *gare* qui immobilise à l'arrêt tous les sémaphores de sens contraire de la section dans la-

Digitized by Google

quelle le train va s'engager, jusqu'à ce que cette section soit dégagée. Je n'insisterai pas davantage sur ces appareils, à propos desquels je serais amené à reproduire des considérations très analogues à celles relatives au block de double voie.

III. — Moyen d'éviter les prises en écharpe.

Nous allons examiner maintenant les moyens utilisés pour éviter les prises en écharpe à une bifurcation simple : double voie se divisant en deux doubles voies.

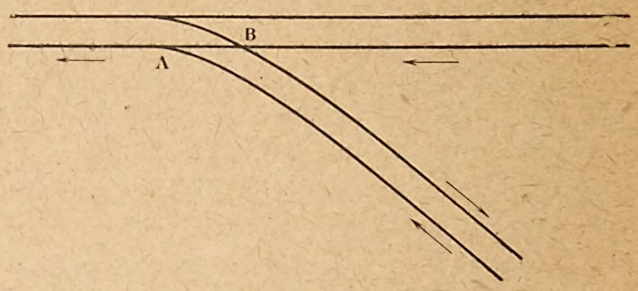


Fig. 1.

La bifurcation normale présente deux points dangereux où deux trains peuvent se prendre en écharpe : en A par convergence et en B par cisaillement (figure 1).

Notons que le *saut de mouton* permet de supprimer la possibilité de

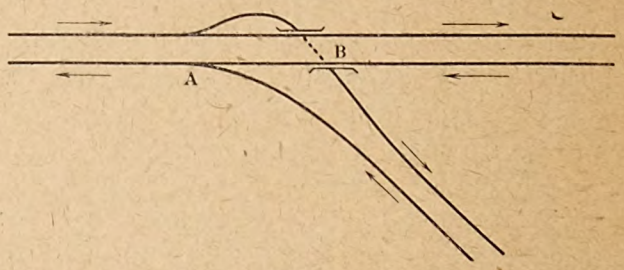


Fig. 2.

cisaillement en B, en faisant passer, comme l'indique la figure 2, une des voies de la branche déviée par dessus ou par dessous les voies de la ligne principale. Mais cette solution est très coûteuse, et souvent même elle est irréalisable, en raison des dispositions locales, en particulier dans les agglomérations.

Il convient donc d'étudier à toutes les bifurcations le moyen d'éviter la prise en écharpe, soit au point A, soit aux points A et B. (J'ai adopté

Digitized by Google

dans tout ce qui va suivre la réglementation Etat. La réglementation des autres réseaux français n'en diffère d'ailleurs que peu).

Reprenons le cas de la bifurcation ordinaire, sans saut de mouton.

Pour protéger un train suivant l'itinéraire YX (fig. 3), contre la prise en écharpe en A par un train suivant l'itinéraire convergent ZX, il suffit d'avoir le moyen d'arrêter en temps utile avant le point A le train venant de Z. Ce moyen sera le signal carré d'arrêt absolu 2 à damier rouge et blanc, que nous ferons précéder à 1 000 mètres environ, comme nous l'avons dit plus haut, d'un damier 8, vert et blanc, destiné à renseigner en temps utile le mécanicien. Il faut de même sur la branche Y, pour protéger le passage d'un train suivant l'itinéraire ZX contre la prise en écharpe en A par un train suivant l'itinéraire YX, le signal carré 4, annoncé par le damier 10.

Le même signal 4 permet, avec l'aiguille 1, d'éviter le cisaillement en B d'un train XZ et d'un train YX. Il suffit de n'ouvrir le carré 4 que si l'aiguille 1 est à gauche, et inversement de ne placer l'aiguille 1 à droite que si le carré 4 est fermé.

En définitive, les deux signaux carrés 2 et 4 suffisent, avec leurs annonciateurs 8 et 10, à éviter les prises en écharpe. Il y a lieu d'y ajouter un *indicateur de direction* à l'aiguille 1, prise en pointe par les trains, et destiné à permettre aux mécaniciens d'obtenir l'assurance que l'aiguille donne bien la direction où leur train doit aller.

De plus, tout indicateur de direction doit évidemment être annoncé à distance au mécanicien par un signal spécial, qui sur l'Etat est une plaque Y, lui indiquant qu'il arrive à une bifurcation prise en pointe, où il doit s'assurer que l'indicateur de direction donne bien la direction convenable.

Enfin, comme il n'est pas possible, sauf dans le cas des aiguilles très allongées, à petit angle de déviation, d'autoriser le passage en vitesse des trains empruntant soit dans un sens, soit dans l'autre, la branche déviée, il convient d'imposer à ces trains le ralentissement convenable, fixé à *30 kilomètres* pour les trains munis et à *15 kilomètres* pour les trains non munis, par les *disques verts* 1 et 6, placés à 1 000 mètres environ de la bifurcation. Le disque vert 1, côté pointe, est mobile. Il peut être effacé pour le passage des trains suivant l'itinéraire direct XY, mais doit être présenté aux trains suivant l'itinéraire dévié XZ. Au contraire, le disque vert 6 placé en talon sur la branche déviée, est fixe, puisque tous les trains qui le rencontrent sont en déviation et doivent nécessairement ralentir. Sur la branche Y, il n'y pas lieu de placer de disque vert, quand cette branche est directe,

Digitized by Google

comme dans le cas de la figure 3, et que par conséquent, tous les trains suivant l'itinéraire YX peuvent passer sans ralentissement.

On arrive ainsi, pour une bifurcation, à la signalisation de la fig. 3 qui est suffisante pour assurer la sécurité.

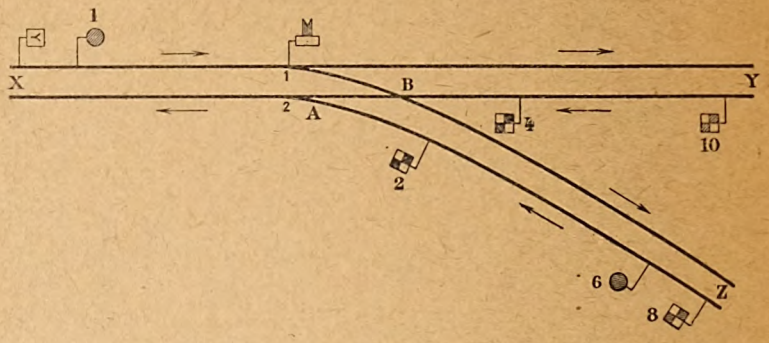


Fig. 3.

En fait, la signalisation qu'on rencontre en France, même sur le réseau de l'Etat, est un peu plus compliquée. On trouve le plus souvent, en dehors des signaux déjà indiqués (voir fig. 4) :

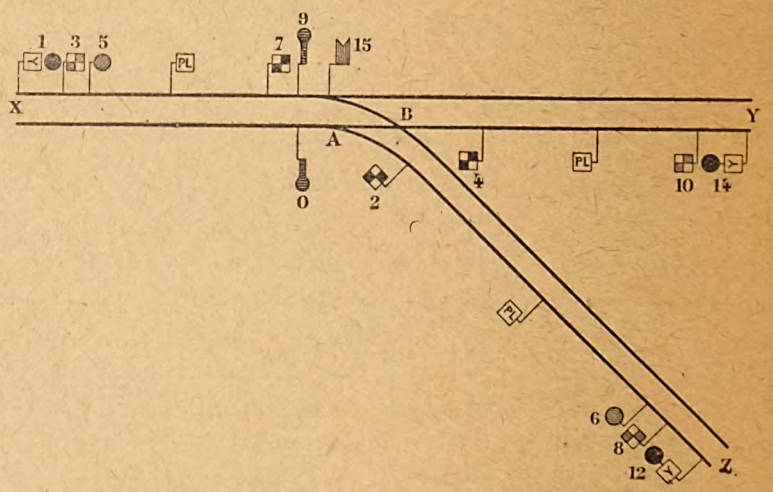


Fig. 4.

a) Une plaque Y sur chacune des deux branches de talon, servant à renseigner le mécanicien sur le fait qu'il approche d'une bifurcation;

b) Un carré de pointe 7, précédant l'aiguille 1, et le damier 3 correspondant. La principale raison d'être de ce carré est de permettre à l'aiguilleur de disposer d'un signal d'arrêt absolu bien visible, dans le

Digitized by Google

cas où il est obligé d'arrêter un train auquel il ne peut donner la direction voulue. Dans le cas, par exemple, où l'aiguilleur vient d'autoriser le passage d'un train suivant l'itinéraire YX, en ouvrant le carré 4, et en disposant l'aiguille 1 à gauche, il y a intérêt, si à ce moment un train devant suivre l'itinéraire XZ est attendu à présenter à ce train un signal carré fermé, beaucoup plus visible que l'indicateur de direction, que le mécanicien doit dans la circonstance considérer comme un signal d'arrêt;

c) Les sémaphores 9 et 0, destinés à assurer l'espacement des trains de même sens par le block-system;

d) Trois disques rouges 1, 12 et 14 et les poteaux-limite de protection (P.L.) correspondants. Nous avons vu dans la première partie que, sur un grand nombre de lignes équipées à l'aide d'un block autre que le bloc automatique, la protection des trains arrêtés était prescrite, pour éviter toute possibilité de rattrapage par le train suivant. Il faut nécessairement prévoir des arrêts de trains relativement fréquents devant chaque signal carré, et il serait évidemment inadmissible pour la régularité du service que le conducteur d'arrière de chaque train arrêté à un signal carré doive aller à la protection à 1 000 mètres. On a donc été conduit à assurer la protection de ce train par un signal spécial, le disque rouge, imposant à tout train qui le rencontre fermé, la « marche à vue » aussitôt que cela lui est possible. (Cela doit l'être au plus tard au poteau-limite de protection) et l'arrêt soit sur l'obstacle, soit au point protégé (dans la circonstance au signal carré suivant, même si ce carré est ouvert).

Sous quelles conditions les signaux dont nous venons de dresser la liste assurent-ils efficacement la sécurité ? Il faut évidemment :

1° que l'aiguilleur protège bien chaque passage de train en manœuvrant les leviers convenables d'aiguilles et de signaux;

2° que ces signaux obéissent bien à leur manœuvre, en se mettant dans la position correspondant à celle de leur levier;

3° que les mécaniciens des trains survenant respectent leurs indications.

L'examen des deux premiers points me conduit à parler des postes d'aiguilleurs, l'examen du troisième me conduira à vous parler du crocodile, et du contrôle automatique des trains.

Les divers signaux et aiguilles d'une zone déterminée sont actionnés par des leviers de manœuvre qui sont habituellement groupés dans un poste d'aiguilleur. Dans les postes anciens, il y a habituelle-

Digitized by Google

ment un levier par signal, et un levier par aiguille (ou un levier pour un très petit nombre d'aiguilles voisines, quand ces aiguilles peuvent toujours sans inconvénient être manœuvrées simultanément). La liaison entre les leviers et les appareils manœuvrés est faite habituellement par fil (simple ou double) pour les signaux, et par tringles rigides (quelquefois par fils) pour les aiguilles. Dans ce système de postes, qu'on appelle souvent « postes mécaniques », la force musculaire à dépenser par l'aiguilleur augmente rapidement avec la distance des appareils manœuvrés, et on n'arrive que péniblement à manœuvrer par tringle une aiguille située à plus de 300 mètres de son levier de manœuvre. La zone possible d'action de ces postes est donc assez limitée. Aussi a-t-on eu l'idée de faire appel à une énergie autre que la force musculaire de l'aiguilleur, l'eau sous pression, l'air comprimé, et le plus habituellement maintenant l'électricité. Dans ce type de postes, qu'on appelle « postes à pouvoir », les aiguilles et les signaux sont manœuvrés par des moteurs et les leviers de manœuvre, de petite dimension, n'entraînent plus que les commutateurs fermant les circuits convenables d'alimentation des moteurs. Les postes à pouvoir se divisent eux-mêmes en deux catégories : les postes « à leviers individuels », dans lesquels, comme dans les postes mécaniques, dont ils ne diffèrent que par le mode de liaison entre les leviers et les appareils manœuvrés, on trouve un levier par signal ou par aiguille — et les postes à « leviers d'itinéraires » dans lesquels on trouve un seul levier (quelquefois deux dans certains types de postes) par mouvement possible, ce levier unique servant à commander toutes les aiguilles et tous les signaux, quel que soit leur nombre, intervenant dans la constitution même et dans la protection du mouvement correspondant. On arrive ainsi à une très grande rapidité dans l'exécution du service, l'aiguilleur n'ayant plus qu'un seul levier à manœuvrer pour préparer un passage, tandis que dans les postes à leviers individuels, il est fréquemment obligé d'en manœuvrer une dizaine, et quelquefois davantage. De plus, on obtient souvent avec ce système, une diminution importante du nombre des leviers. Dans le cas particulier de la bifurcation de la figure 4, le nombre des leviers serait réduit à 4 au lieu de 13.

Après ces définitions des différents types de postes, revenons à l'examen des conditions à réaliser dans ces postes pour qu'ils assurent la sécurité.

1° Il faut d'abord, avons-nous dit, que l'aiguilleur manœuvre con-

Digitized by Google

venablement ses leviers, c'est-à-dire qu'il ait soin de n'ouvrir un signal autorisant un mouvement que si toutes les aiguilles situées sur l'itinéraire du mouvement sont bien dans la direction convenable, et surtout si les autres signaux et aiguilles sont bien dans la position interdisant tout mouvement incompatible.

Dans les postes simples, comportant peu de leviers, comme la bifurcation que nous avons étudiée ci-dessus, l'effort intellectuel à faire par l'aiguilleur ne serait pas excessif. Il ne faut pas perdre de vue néanmoins qu'une erreur matérielle est facile à commettre et qu'une simple distraction pourrait conduire un aiguilleur, manœuvrant un levier au lieu du levier voisin, à ouvrir un signal alors qu'il veut en ouvrir un autre. Il n'en faudrait pas davantage pour causer un accident.

D'autre part, dans les grands postes, commandant des dispositions de voies compliquées et où sont rassemblés parfois jusqu'à plus de 100 leviers, il deviendrait absolument impossible aux aiguilleurs de fournir l'effort d'attention nécessaire pour assurer convenablement le service, et l'on a dû venir en aide à ces agents par les « enclenchements ». Les enclenchements sont des relations établies entre les leviers des divers appareils et empêchant *matériellement* la réalisation avec ces appareils de combinaisons dangereuses pour la sécurité. L'étude de ces relations, qui sont le plus souvent réalisées mécaniquement, même dans les postes à pouvoir, est très complexe et constitue une partie très importante de la science de la sécurité, mais nous ne pouvons songer à l'aborder ici.

Les enclenchements donnent l'assurance qu'au moment où un aiguilleur ouvre un signal, tous les signaux nécessaires pour protéger le mouvement qu'il va ainsi permettre sont bien fermés. Mais cela ne suffit pas. Il faut, de plus, qu'au moment où cet aiguilleur ferme un signal à distance, nécessaire pour protéger un mouvement, il ait l'assurance qu'un train ne vient pas précisément de franchir ce signal à distance ouvert. Ce train, non prévenu à distance, ne pourrait en effet en général pas respecter le signal carré suivant. La plupart des grands postes sont pratiquement à l'abri de ce danger par le fait qu'ils sont au régime de la « voie fermée », c'est-à-dire qu'ils gardent leurs signaux habituellement fermés, et qu'ils attendent l'annonce d'un train pour ouvrir — si rien ne s'y oppose — les signaux permettant le passage de ce train. Le danger existe néanmoins, dans le cas où un train annoncé n'arrive pas, soit qu'il soit arrêté avant le poste pour une cause accidentelle quelconque, soit qu'il y ait eu erreur d'annonce.

Digitized by Google

Pour parer à ce danger, quelques postes mécaniques, et la plupart des postes à pouvoir, possèdent des « enclenchements de transit ». On désigne ainsi un dispositif comportant, d'une part des pédales d'entrée et de sortie sur chacun des itinéraires possibles du poste (ou l'isolement de la voie sur la totalité de ces différents itinéraires), d'autre part, des verrous électriques montés sur les divers leviers du poste, et reliés aux pédales dans des conditions telles que, un itinéraire étant préparé avec ouverture des signaux correspondants, l'attaque par le train de la pédale d'entrée de cet itinéraire immobilise dans leur position fermée tous les leviers de signaux pouvant autoriser un itinéraire incompatible avec le premier, même quand les signaux autorisant ce premier itinéraire auront été refermés, et cela jusqu'à l'attaque de la pédale de sortie de l'itinéraire.

2° Il faut de plus que les appareils eux-mêmes (signaux et aiguilles) obéissent bien à leur levier de manœuvre.

Cela est évidemment avant tout une question de bonne construction et de parfait réglage des appareils. Mais, malgré tout le soin apporté à cette partie du service, il n'est pas possible, par exemple, d'avoir la certitude que *jamais* un signal ne restera ouvert, bien que son levier de manœuvre soit dans la position « fermée ». Il est donc indispensable que l'aiguilleur ait le moyen de savoir, après chaque manœuvre du levier, si le signal a effectivement obéi. C'est pourquoi les signaux comportent un commutateur, ouvrant ou fermant suivant la position de la cocarde elle-même, un circuit actionnant un appareil de contrôle — habituellement un voyant — placé sous les yeux de l'aiguilleur, voyant qui passe au rouge quand le signal est effectivement fermé. Un aiguilleur ne doit considérer un signal comme fermé que si l'appareil de contrôle a régulièrement fonctionné au moment de la mise à l'arrêt du levier. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si le voyant ne passe pas au rouge, l'aiguilleur *doit considérer le signal comme resté à la voie libre*, et remplacer le signal, sur lequel il ne doit plus compter pour protéger le train ou la manœuvre, par tout autre moyen convenable et au besoin par des signaux à main portés à 1 000 mètres. Les aiguilles sont munies d'un dispositif de contrôle analogue.

Il y avait évidemment intérêt à matérialiser cette prescription, purement morale au début, faite aux aiguilleurs d'observer, après chaque manœuvre d'un levier, l'appareil de contrôle correspondant. Cette matérialisation est réalisée partiellement dans quelques postes mécaniques, complètement dans la plupart des postes à pouvoir, par

Digitized by Google

le « contrôle impératif ». On désigne ainsi un dispositif réalisant les enclenchements *sur les signaux et sur les aiguilles* elles-mêmes, et non plus sur les leviers, dans les conditions suivantes : quand un aiguilleur remet à l'arrêt le levier d'un signal après le passage d'un train, les enclenchements qui maintenaient à l'arrêt les signaux autorisant un mouvement incompatible ne sont libérés que si le *signal lui-même* et non plus seulement son levier, est bien revenu dans la position fermée. De même, on réalise sur les aiguilles un dispositif de contrôle impératif qui empêche l'ouverture de certains signaux si les *lames* de l'aiguille (et non plus son levier) ne sont pas arrivées à fond de course dans la direction convenable. On va même le plus habituellement, dans cet ordre d'idées, jusqu'au « contrôle impératif permanent ». On désigne ainsi un dispositif dans lequel, non seulement l'ouverture des signaux est subordonnée, comme je viens de le dire, au collage (et le cas échéant au verrouillage) de l'aiguille, mais encore, cette ouverture reste en permanence sous la dépendance de ce collage correct, de telle façon que si, le signal étant ouvert, l'aiguille vient, pour une cause quelconque, à ne plus coller parfaitement, le signal se referme immédiatement.

Je n'indiquerai pas quelles sont les idées qui doivent présider à l'étude d'un poste à pouvoir par un constructeur. Je ne pourrai en effet que répéter, à peu de chose près, ce que j'ai dit pour l'étude des appareils de block. Notons seulement que là encore, comme pour le block, les signaux lumineux fournissent une solution fort intéressante.

3° Il faut enfin que les mécaniciens respectent les indications des signaux.

La première condition pour cela est évidemment qu'ils voient sûrement au passage les signaux à distance. Ces signaux sont naturellement implantés à des points où leur visibilité est aussi grande que possible. Mais ils peuvent, par temps de brouillard, n'être visibles par les mécaniciens que pendant un temps *très court*, quand ces agents passent à leur voisinage immédiat. On a donc été amené à se demander s'il ne convenait pas, pour faciliter la tâche de ces agents, d'adopter un appareil les avisant automatiquement qu'ils franchissent un signal fermé. Cette question préoccupe depuis longtemps tous les réseaux, mais la mise au point d'un tel appareil était très délicate. Il ne faut pas perdre de vue en effet que sa mise en service aurait risqué — si des précautions spéciales n'avaient pas été prises en consé-

Digitized by Google

quence — d'entraîner la diminution de la vigilance des mécaniciens. Si l'appareil était parfait, cela n'aurait pas d'autre importance. Mais nous ne pouvons guère espérer arriver à un type d'appareil absolument parfait, et il faut nécessairement prévoir des ratés. Dans ces conditions, il était permis de se demander si le *statu quo* n'était pas préférable. Les réseaux français ont adopté un appareil qui résout la question de la façon suivante. Au droit d'un signal franchissable (disque rouge, annonciateur à damier vert et blanc, disque vert), un sifflet spécial est mis en action sur la machine, prévenant ainsi le mécanicien. De plus, le franchissement du signal à l'arrêt est inscrit par un signe spécial sur la bande de l'enregistreur de vitesse de la machine. Enfin, le mécanicien doit faire preuve de vigilance en appuyant sur une manette spéciale toutes les fois qu'il va franchir, volontairement et conformément aux prescriptions réglementaires, un signal franchissable fermé. L'actionnement de cette manette est inscrit par un autre signe spécial sur la bande. Tout signe de franchissement de signal fermé doit donc être précédé d'un signe de vigilance. S'il est constaté, par la vérification des bandes à laquelle il est procédé périodiquement, qu'il en est autrement, le mécanicien est puni. Cet agent garde donc un intérêt direct à continuer à bien observer les signaux.

Faut-il aller plus loin, jusqu'au « contrôle automatique » des trains, c'est-à-dire jusqu'au freinage automatique des trains passant près d'un signal à distance fermé ? Les réseaux français, après divers essais, n'ont pas cru devoir entrer dans cette voie. Il semble bien d'ailleurs que le freinage automatique n'ait de supériorité sur le simple avertissement que dans le cas où le mécanicien et le chauffeur sont simultanément hors d'état de faire leur service, et en pratique, cette éventualité est-elle vraiment à redouter ?

Avant de terminer, je voudrais encore répondre à une autre question.

Nous venons d'examiner les conditions auxquelles il est désirable que satisfassent les appareils de sécurité, et plus particulièrement le block automatique et les postes à pouvoir. Dans quelle mesure les appareils modernes se rapprochent-ils de cet idéal ? En fait — et je suis heureux de pouvoir rendre ici cet hommage aux constructeurs — il est hors de doute qu'ils l'ont pratiquement atteint. Les constructeurs, aussi bien ceux qui sont spécialisés, que les services électriques des réseaux qui ont étudié eux-mêmes leurs installations, sont arrivés

Digitized by Google

à nous donner des appareils remarquables, qui, incontestablement soutiennent avantageusement la comparaison avec ceux des constructeurs étrangers.

Mais, dira-t-on, ces appareils excellents ne sont pas encore à beaucoup près, d'un emploi général; et dans quelles conditions est assurée la sécurité sur les lignes où ils n'existent pas encore ? Là encore, je suis heureux de pouvoir dire que, même sur ces lignes, la sécurité est remarquable. Grâce à la science des dirigeants des réseaux, grâce au dévouement et à la valeur professionnelle des agents d'exécution, les résultats sont excellents. Je ne saurais mieux faire que de donner le nombre de voyageurs tués par milliard de voyageurs kilométriques. Il atteignait 1, 5 pour la période de 1904 à 1913. Il s'est relevé notablement pendant la guerre et après la guerre, mais en 1922, il était revenu au chiffre d'avant-guerre, et il s'est très nettement amélioré depuis. En 1923, nous avons eu 0,6 voyageurs tués par milliard de voyageurs kilométriques et 0,8 en 1924.

Digitized by Google

Digitized by Google

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA SIGNALISATION AUTOMATIQUE DES CHEMINS DE FER

par M. Laloy.

Avantages de la signalisation automatique. — Différentes catégories de bloc automatique : bloc à circuit de voie, bloc à pédales. — Conditions que doit remplir une installation de signalisation. — Schémas. — Appareillage : moteurs, signaux lumineux, relais de voie. — Circuit de voie à courant alternatif pour traction électrique. — Résultats obtenus en bloc automatique, en France.

Avantages présentés par la signalisation automatique.

Tous les réseaux de chemins de fer sont actuellement convaincus de la supériorité qu'offre la signalisation automatique sur la signalisation manuelle, au point de vue sécurité et souplesse d'exploitation. (En particulier, cette signalisation protège contre les ruptures de rails, dérives de wagons. Elle permet un accroissement notable de trafic, offre le maximum de sécurité, etc.).

Nous croyons utile d'insister sur d'autres avantages qu'offre la signalisation automatique et auxquels on n'attache pas en général, tout l'intérêt qu'ils méritent.

a) Au point de vue pécuniaire, la signalisation automatique, permettant la suppression de tout le personnel de manœuvre des signaux, entraîne des économies considérables dans les frais d'entretien, et de ce fait, la dépense d'installation d'une signalisation automatique peut toujours être amortie dans un temps très court, de l'ordre de dix années au maximum.

b) Elle permet de substituer le travail des appareils à celui du personnel. Elle permet le remplacement d'un *grand nombre de sous-agents* (agents de manœuvre) par un *petit nombre d'agents d'instruction technique plus développée* (*agents d'entretien*).

Il en résulte qu'au point de vue social la signalisation automatique offre un intérêt considérable qui, à lui seul, devrait suffire à retenir l'attention des services publics et des Compagnies de Chemins de fer.

c) Notons enfin que certains problèmes de signalisation entraînent une complexité et une rapidité de manœuvres d'appareils telles, qu'il est impossible de les résoudre autrement que par des moyens automatiques.

A titre d'exemple, nous citerons le cas de l'aiguille prise en pointe

Digitized by Google

à l'entrée de la gare de Louis Blanc de la ligne 7, du Chemin de fer Métropolitain de Paris.

Les trains devant être dirigés successivement sur l'une et l'autre branche de l'aiguille, celle-ci doit être manœuvrée à chaque passage de train. L'exploitation se faisant à un intervalle entre trains de 1 minute 5, on conçoit qu'il est impossible de demander à un aiguilleur d'effectuer toutes les manœuvres que comporte une exploitation aussi serrée, et il a fallu adopter un dispositif qui permette aux trains d'effectuer eux-mêmes automatiquement toutes les opérations : blocage des signaux, manœuvre de l'aiguille lorsque le point de garage franc est franchi, ouverture à nouveau des signaux lorsque le contrôle de bon fonctionnement de l'aiguille s'est produit et que la nouvelle voie donnée est effectivement dégagée de tout essieu, etc...

On trouverait des exemples aussi frappants dans le problème de la manœuvre des aiguilles de tramways.

Dans l'exposé qui suivra, nous envisagerons surtout les installations de bloc automatique, c'est-à-dire les installations destinées à protéger la marche des trains et à les écluser dans des « cantons » successifs.

Différentes catégories de bloc automatique.

Il existe deux catégories différentes de bloc automatique.

1° *Bloc automatique à circuit de voie.*

Ce bloc est le plus répandu, c'est celui qui intéresse le plus à l'heure actuelle les réseaux ferrés.

Il est basé sur le fonctionnement du circuit de voie.

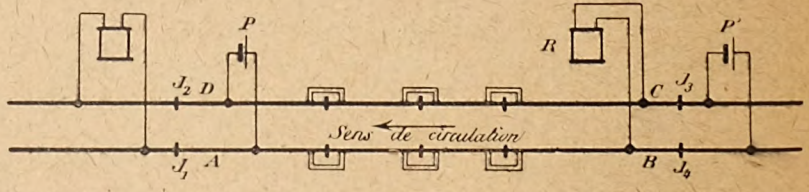


Fig. 1. — Bloc automatique à circuit de voie.

On appelle ainsi un circuit constitué par 2 files de rails (fig. 1), isolées du reste de la voie par des éclissages isolants appelés joints isolés : J_1, J_2, J_3, J_4. A une extrémité se trouve un électro-aimant, appelé « relais » qui est branché sur les 2 files de rails. A l'autre extrémité, branchée de la même façon, se trouve une source d'énergie P.

Le courant émanant de P excite l'électro R en passant par les files de rails A. B et C.D.

Digitized by Google

Si une des files de rails est interrompue, le circuit est coupé et le relais désexcité. Si les 2 files de rails sont court-circuitées par un essieu, le relais est également désexcité.

Il en résulte que le relais R n'est excité, que si la voie entre AD et BC est ininterrompue et libre de tout véhicule.

L'excitation du relais R matérialise donc la libération par tout véhicule de la portion de voie envisagée, et le parfait état de la dite portion de voie. Ce bloc est un bloc à action « continue » en ce sens qu'un essieu, par l'effet du court-circuit qu'il établit entre 2 rails, exerce une action permanente se traduisant par la désexcitation du relais R, ce qui constitue une opération de « blocage », c'est-à-dire de mise en position d'arrêt de tout signal commandé par le relais R.

2° *Bloc à pédales.*

Il existe un autre système de bloc que nous appellerons « bloc à action passagère ou intermittente » (figure 2).

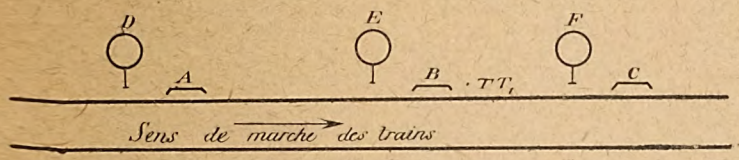


Fig. 2. — Bloc automatique à pédales.

Dans ce système de bloc, des appareils A, B, C, sont répartis sur la voie au droit des signaux D, E, F.

Un train passant sur l'appareil B (pédale par exemple), produit une opération qui a pour but : 1° de bloquer le signal E et 2°, après que cette opération de blocage est effectuée et « contrôlée », de débloquer le signal amont D qui avait été préalablement « bloqué » lors du passage du train en A.

Un tel bloc est donc basé sur des actions passagères des convois.

Il présente certaines infériorités sur le bloc à circuit de voie, qui ont pour résultat d'entraîner, dans certains cas spéciaux, des complications de circuits pour obtenir une sécurité absolue.

D'autre part, le bloc par pédales ne protège pas contre les ruptures de rails et les dérives.

Ce système de bloc tendant à disparaître, nous n'y avons fait allusion qu'à titre documentaire, en raison de la très brillante carrière qu'il a fournie sur certains réseaux et en raison de l'intérêt qu'il pourrait offrir dans certains cas particuliers, vu son faible prix d'installation.

Dans tout ce qui suivra, nous aurons surtout en vue le bloc par circuit de voie qui est le bloc de l'avenir.

Digitized by Google

Conditions que doit remplir une installation de signalisation.

Il est utile de résumer les principales conditions que doit remplir une installation de signalisation.

1° Tout d'abord, une telle installation ne doit en aucun cas donner de « fausses indications de voie libre », c'est-à-dire permettre l'ouverture d'un signal qui devrait être à l'arrêt pour protéger un train.

Autrement dit, toute une catégorie de dérangements est absolument inadmissible et ceci implique évidemment des dispositifs et des appareils d'un genre tout à fait spécial.

Nous insistons sur cette condition essentielle, qu'on ne trouve pas en général dans les installations électriques ordinaires (téléphoniques en particulier).

2° Fonctionnement aussi parfait que possible.

En ce qui concerne l'exploitation de chemins de fer, on conçoit qu'une telle condition offre un intérêt exceptionnel.

Tout d'abord une signalisation qui permettrait de nombreux dérangements, entraînerait des retards de trains qui constitueraient une gêne inadmissible dans l'exploitation.

D'autre part, il est intéressant de noter tout spécialement qu'un tamponnement ne peut résulter que de deux causes simultanées, dont l'une est toujours une perturbation dans le service d'exploitation, l'autre cause étant une cause accessoire de nature quelconque. (En général une mauvaise observation des signaux).

Or, dès qu'une installation de signalisation est en dérangement, elle occasionne un retard de train d'où perturbation dans l'exploitation.

On peut donc dire qu'en se plaçant uniquement au point de vue de la *sécurité*, la parfaite régularité de fonctionnement des signaux est une condition qu'il importe essentiellement de remplir.

Ce ne serait guère un paradoxe d'affirmer qu'on enregistrera moins d'accidents sur une signalisation ne remplissant pas parfaitement toutes les conditions de *sécurité* mais marchant d'une façon absolument régulière, que sur une installation rigoureusement parfaite au point de vue *sécurité*, mais qui pour une raison quelconque (complication des circuits et des conditions de contrôle de fonctionnement des appareils imposés par exemple), donnerait lieu à de nombreux dérangements.

Les différentes parties constitutives d'une installation de bloc automatique sont :

1° Le schéma et les circuits reliant les divers appareils;

2° Les appareils eux-mêmes.

Digitized by Google

Schémas.

Ceux-ci, dans le but de répondre aux conditions ci-dessus, doivent être aussi simples que possible, nécessiter le minimum de conducteurs, et surtout doivent être conçus pour qu'en aucune circonstance, une avarie quelconque puisse se traduire par une fausse indication de voie libre.

Il est évidemment impossible de codifier les règles d'établissement d'un schéma, nous énumérons toutefois les quelques prescriptions essentielles dont il y a lieu de ne jamais se départir :

a) Une indication de voie libre doit toujours résulter d'une dépense d'énergie.

b) La source d'énergie doit être à une extrémité du circuit, et l'appareil utilisateur à l'autre extrémité.

Il est nécessaire dans certains cas de couper les deux fils d'un circuit au lieu d'un seul pour être certain que ce circuit soit neutre.

d) Toute rupture ou mélange de fils doit se traduire par une indication d'arrêt.

Appareillage.

Avant d'examiner les divers types d'appareils rentrant dans une installation de bloc et les qualités particulières qu'ils doivent présenter, on peut énumérer un certain nombre de conditions générales, auxquelles tous les appareils doivent satisfaire :

a) Un appareil doit être approprié à ses conditions d'implantation. A ce point de vue, un appareil convenant à la voie ferrée d'un pays peut ne pas convenir à la voie ferrée d'un autre pays : le ballast, le climat pouvant être différents.

b) Un appareil ne doit pouvoir donner une indication de « voie libre » que sous l'effet d'un courant. Lorsque l'appareil est « neutre » sa position doit correspondre à la position « arrêt ».

c) Aucun coïnçage, gommage, ne doit pouvoir maintenir un appareil dans une position indue de voie libre.

d) La plus grande attention doit être apportée aux dispositifs qui remettent un appareil en position « d'arrêt ».

e) Les parties électriques ne doivent jamais avoir à supporter d'efforts mécaniques, ceux-ci devant se répercuter uniquement sur des pièces n'ayant aucune solidarité directe avec les bobinages, contacts, etc...

f) La qualité de la matière doit être parfaite sans qu'aucune considération de prix puisse intervenir à ce sujet.

Digitized by Google

g) Tous les appareils doivent donner lieu à des vérifications, essais et épreuves faits avec le plus grand soin.

h) Enfin, avant d'être adopté définitivement, un nouvel appareil doit avoir donné lieu à un essai de plusieurs années, dans ses conditions réelles de fonctionnement.

Revue des principaux appareils qu'on trouve dans une installation de bloc automatique.

1° *Moteurs de signaux.*

Les signaux mécaniques sont en général actionnés par des moteurs électriques consommant de 1 à 5 A sous 8 V et qui, par l'intermédiaire d'engrenages, mettent les ailes ou cocardes des signaux dans la position d'ouverture.

Le signal étant « ouvert », le circuit du moteur est coupé et tout le dispositif est maintenu dans cette position sous l'effet de l'excitation de bobines de faible consommation (environ 0,05 W), appelées « bobines de maintien ».

Lorsque ces bobines sont désexcitées, le signal, sous l'influence de la pesanteur, revient en position d'arrêt.

Dans ce mouvement, et suivant le type d'appareil employé, ou bien :

1° tout le mouvement d'engrenage et le moteur électrique sont ramenés en arrière (moteur à dévirage) ou bien :

2° les engrenages seuls sont ramenés en arrière, le moteur électrique étant alors désolidarisé du système (moteur à semi-dévirage) ou bien :

3° aucun organe de l'appareil n'est ramené en arrière, l'aile (ou la cocarde) se trouvant alors complètement désolidarisée du mécanisme qui a servi à la mettre à « voie libre » (moteur désengageur).

Il est indiscutable que ce dernier type d'appareil (moteur désengageur) est supérieur aux deux autres, car on a intérêt à supprimer toute résistance passive pouvant s'opposer à la mise en position d'arrêt d'un signal mécanique. Le moteur à désengageur est le seul actuellement employé sur les nouvelles installations réalisées en France. Il est également employé en grand en Amérique, lorsque la commande du signal se fait du pied de celui-ci.

Par contre, les moteurs à désengageur américains étant très volumineux et susceptibles de masquer les ailes des signaux lorsqu'ils sont placés en tête de mât, les Américains ont été obligés pour cette raison de revenir au moteur à dévirage chaque fois que le signal est mû par un moteur placé sur l'axe de l'aile.

Cette mesure est à notre avis des plus regrettables au point de vue « sécurité ».

Digitized by Google

En ce qui concerne l'emplacement de l'appareil de commande d'un signal, on se trouve en présence de deux écoles :

Les unes préconisent le moteur au pied du signal.

Les autres, le moteur en tête de mât sur l'axe de l'aile.

La première solution offre des avantages au point de vue facilité de visite et d'entretien, elle réduit les liaisons électriques entre le moteur et les relais. Par contre, elle entraîne l'allongement des commandes mécaniques reliant l'aile à l'appareil de commande.

La deuxième solution au contraire, réduit les transmissions mécaniques au détriment des liaisons électriques.

2° *Signaux lumineux.*

Cette question ayant été déjà traitée dans une communication faite à la Société Française des Electriciens, nous ne mentionnerons que pour mémoire les signaux donnant une indication lumineuse colorée de jour et de nuit.

Deux types de signaux de ce genre sont actuellement employés en France :

dans un de ces types de signaux, chaque feu est constitué par une lentille unique, éclairée par une lampe à plusieurs filaments;

dans l'autre type, chaque feu comporte plusieurs lentilles éclairées chacune par une lampe à basse tension à filament unique.

3° *Relais de voie.*

Le relais est l'appareil fondamental du bloc automatique.

Pour comprendre les difficultés que présente sa réalisation, il est utile d'avoir en tête ses conditions de fonctionnement qui peuvent se résumer comme suit :

L'énergie mise en jeu est à très faible tension puisqu'elle est fournie par deux piles en général. D'autre part, les deux bornes du relais sont réunies aux deux rails qui ne présentent entre eux qu'une résistance des plus faibles (de l'ordre de 2 ohms au kilomètre).

Notons d'autre part que, pour avoir une intensité suffisante dans le relais, il faut augmenter la conductibilité des rails et pour cela il faut shunter les éclisses mécaniques par une liaison électrique constituée en général de 2 fils de fer bagués dans les rails, et donnant une résistance de 3/1000 ohms environ.

Les remarques ci-dessus font ressortir des conditions de fonctionnement absolument différentes de celles qui régissent les installations électriques ordinaires.

Le relais de voie à courant continu est en général un électro-aimant, dont l'armature établit ou rompt des contacts.

La résistance normale du bobinage d'un relais de voie est de 4 ohms. L'appareil doit être assez sensible et présenter une assez grande marge

Digitized by Google

de fonctionnement pour ne pas être influencé par les variations normales des piles et par la variation de la résistance d'isolement du ballast qui le shunte et qui change de valeur, suivant que le temps est sec ou humide.

L'appareil doit être très sensible au court-circuit pour que sa désexcitation soit certaine par le shunt d'un seul essieu.

Le fer doit être de toute première qualité et surtout ne présenter aucune rémanence.

La puissance à laquelle se désexcite un relais de voie est en général 1/3 ou 1/2 de la puissance minima nécessaire pour l'exciter.

Inutile de dire qu'au point de vue mécanique, cet appareil doit être particulièrement bien étudié, et qu'en particulier tout risque de coincage doit être éliminé.

N'oublions pas en effet, que le relais de voie abandonné en campagne sans surveillance est l'appareil qui matérialise l'absence de danger qu'il y a pour un train à pénétrer dans la section de voie qu'il protège. On doit éviter d'y toucher, et en fait un relais doit pouvoir rester des années sans nécessiter aucun entretien. Bien entendu, toute intervention humaine ne doit provenir que d'un agent sûrement qualifié et connaissant parfaitement son métier.

Le problème du relais de voie semble être parfaitement résolu à l'heure actuelle, car plusieurs dizaines de milliers de ces appareils dont certains sont en service depuis trente ans, fonctionnent d'une façon des plus régulières et pratiquement sans entretien.

Au sujet des caractéristiques des relais de voie à courant continu, il est intéressant de noter que les Américains, qui possèdent des voies ferrées à très mauvais ballast, et par suite dont les rails offrent entre eux un très faible isolement, ont été obligés d'adopter des relais plus sensibles que ceux employés en France. Ils ont même été obligés de diminuer parfois la résistance de bobinage juqu'à 2 ohms, pour pouvoir obtenir l'excitation franche du relais. Ceci évidemment nuit aux qualités de l'appareil au point de vue « sécurité ».

Dans tout ce qui vient d'être exposé au point de vue des relais, nous n'avons envisagé que les circuits de voie à courant continu, c'est-à-dire les circuits de voie où l'énergie est fournie par des piles (en général piles au sulfate de cuivre).

Il existe également des circuits de voie dont l'énergie est fournie par du courant alternatif.

Dans le cas de traction à vapeur, le montage du circuit de voie alternatif est le même que dans le cas de circuit de voie à courant continu.

Digitized by Google

L'alimentation est fournie par un transformateur. En série avec le secondaire du transformateur, est intercalée une résistance pour limiter le débit lors de la mise en court-circuit des rails par un essieu.

Dans le cas de circuit de voie à courant alternatif, on emploie des relais spéciaux.

1° En général, pour les longs circuits de voie, on emploie des relais à deux enroulements appelés relais à deux éléments.

L'appareil fonctionne, soit comme un compteur à disque (relais disque), soit comme un moteur à champ tournant (relais à champ tournant — relais tasse).

Un enroulement est alimenté en local généralement sous 110 V, l'autre enroulement appelé « enroulement de voie » est alimenté sous un à 2 V environ, par le courant qui parcourt le circuit de voie.

On peut dire que l'énergie nécessaire au fonctionnement du relais est ainsi fournie en local, l'enroulement de voie agissant comme excitateur.

Bien entendu, des dispositifs spéciaux utilisant des résistances, des selfs et des capacités sont employés pour obtenir un décalage aussi voisin que possible de 90° entre les courants parcourant respectivement les deux enroulements des relais.

2° Dans le cas de circuit de voie court, on emploie souvent des relais à un élément, c'est-à-dire à un seul enroulement qui prend toute son énergie sur la voie.

Le principe de ces appareils se rapproche en général de celui des compteurs monophasés.

Circuits de voie à courant alternatif pour traction électrique.

Tous les dispositifs que nous venons d'envisager ne s'appliquent pas au cas où la traction est électrique, car il est indispensable, dans ce cas, de permettre le retour de courant de traction dans les rails, ce que ne permet pas le schéma de la figure 1, à cause de la présence des joints isolants.

On est conduit à adopter un dispositif du genre de celui de la figure 3 (prévu pour traction électrique à courant continu).

A chaque groupe de joints isolés, on installe un appareil appelé pont d'inductance, qui se compose de deux connexions inductives A et B, Une connexion inductive est constituée par deux enroulements de barres de cuivre C — D enroulées autour d'un noyau de fer feuilleté. Ces deux enroulements sont en série.

Digitized by Google

Les deux points milieu des connexions inductives sont réalisés par une barre E.

On voit sur la figure, que si le courant de retour traction est égal dans les deux files de rails, les deux enroulements de la connexion inductive étant parcourus par des courants de sens contraire, leur effet magnétique s'annule.

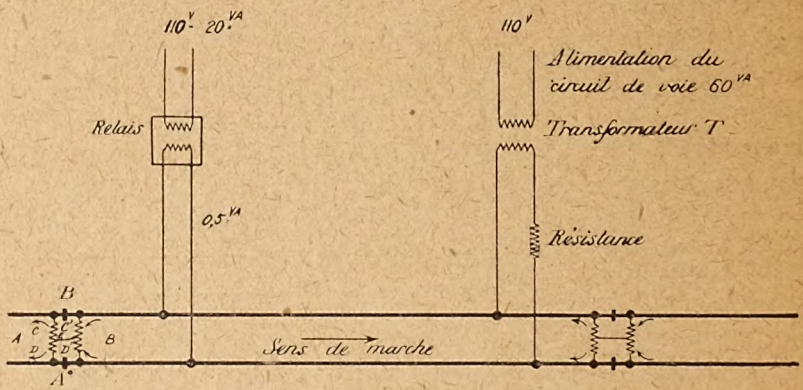


Fig. 3. — Circuit de voie pour traction électrique à courant continu.

Au contraire, le courant de signalisation, provenant du transformateur T par l'intermédiaire des rails, parcourant en série les deux enroulements de la connexion inductive, crée aux bornes une différence de potentiel permettant l'excitation du relais.

Notons, d'autre part, que les connexions inductives sont à circuit magnétique à entrefer, pour parer à la saturation des tôles en cas de déséquilibrage du courant de traction dans les deux files de rails. En général, on prévoit les connexions inductives pour un déséquilibrage de l'ordre de 20 pour cent.

A titre de renseignements, nous donnons ci-dessous l'ordre de grandeur de certaines valeurs intéressant les circuits de voie à courant alternatif :

Z (voie) à 50 périodes 0,9 à 1,2 ohms, au kilomètre

$\cos \varphi = 0,65$.

Résistance d'un pont d'inductance : 0,0003 ohm

Z (connexion inductive) = 0,2 ohm environ.

La figure 4 se rapporte à un circuit de voie à courant alternatif avec connexions inductives à deux enroulements, chaque connexion inductive jouant le rôle de transformateur.

Ce dispositif employé en grand en France (3 000 connexions induc-

Digitized by Google

tives environ en service ou en installation), offre l'avantage de séparer complètement les circuits de signalisation des circuits où circule le courant de traction, et permet en outre une grande souplesse dans le réglage des circuits de voie, puisqu'on peut agir sur les rapports de transformation des deux connexions inductives.

Avant de terminer cet exposé succinct relatif aux circuits de voie; nous croyons intéressant d'attirer l'attention sur une particularité des circuits de voie à courant alternatif :

Dans le cas de la figure 1 (bloc à courant continu), on se rend compte de l'intérêt qu'offre le bon état des joints isolants pour éviter l'excitation indue d'un relais R par la pile voisine P', qui est destinée à exciter le relais de voie précédant en amont le relais R.

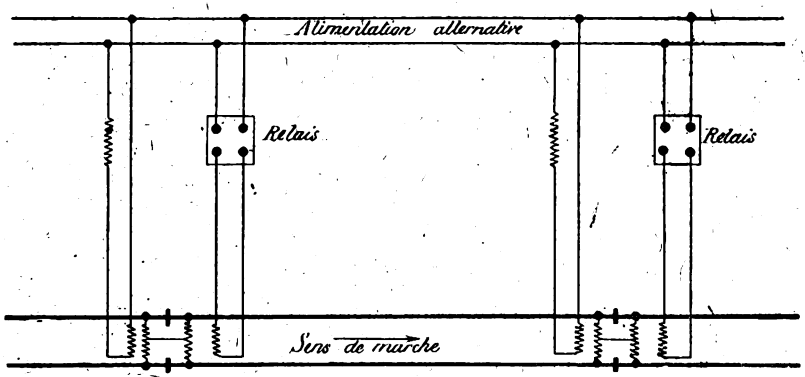


Fig. 4. — Circuit de voie à courant alternatif.

Dans le bloc à courant alternatif, si on a pris soin d'inverser les « polarités » des alimentations successives de voie, il arrive qu'en cas de mauvais joints isolés, l'alimentation voisine d'un relais tend à faire tourner ce relais dans le sens opposé à celui qui correspond à son excitation normale, autrement dit le relais tend à s'appuyer dans sa position neutre c'est-à-dire « sécurité ». Cet avantage disparaît dans certaines installations où on emploie des relais à trois positions, dont le principe consiste à s'exciter tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre suivant la « polarité » du courant qui l'excite, laquelle dépend, grâce à des dispositifs spéciaux, de la position du train à couvrir sur les divers circuits de voie suivant immédiatement le signal considéré.

Le système de bloc avec relais à trois positions, malgré l'infériorité qu'il présente au point de vue sécurité, est fréquemment employé en Amérique, parce qu'il permet la suppression d'une grande partie des canalisations qui sont nécessaires pour relier les postes à relais succes-

Digitized by Google

sifs dans un bloc à relais ordinaires. De ce fait, le prix d'une installation est relativement moins élevé.

Résultats obtenus en bloc automatique en France.

Avant d'achever cet exposé sommaire relatif au bloc automatique, nous croyons intéressant de résumer les résultats obtenus en France, et de les comparer avec ceux qui ont été obtenus à l'étranger.

La première installation de bloc automatique réalisée en France date de 1898. Dès 1900, la Compagnie des Chemins de Fer du Midi entreprenait l'équipement complet des grandes lignes de son réseau. C'est à cette Compagnie qu'est dû l'essor du bloc automatique en France, c'est grâce à elle que les constructeurs français ont pu mettre au point leurs dispositifs et donner la mesure de ce qu'ils étaient capables de produire.

Les chemins de fer de la Grande Ceinture de Paris, le Métropolitain de Paris et le Nord-Sud de Paris, ont équipé également tout leur réseau en bloc automatique.

Par contre, les autres grands réseaux n'ont réalisé à ce jour que des installations partielles, quoique certaines soient des plus importantes.

En Amérique, le bloc automatique a pris, au contraire, une extension formidable et générale; à l'heure actuelle, toutes les grandes lignes sont équipées en bloc automatique.

Il est difficile de comparer, au point de vue fonctionnement, les installations françaises et les installations américaines, ces dernières sont en effet constituées par des postes de bloc pur et simple, sans aucune addition, tandis que les installations faites en France comportent de nombreuses complications provenant de ce que la signalisation d'espacement de trains est souvent fusionnée avec la signalisation de manœuvre, et que les installations de bloc servent à actionner de nombreux appareils qui n'existent pas en Amérique, tels que crocodiles, porte-pétards, etc...

On peut dire qu'à nombre de signaux égaux, une installation de bloc en France est deux à trois fois plus importante qu'en Amérique.

Il est indispensable d'avoir toujours cette proportion présente à l'esprit, lorsqu'on compare le fonctionnement du bloc dans les deux pays.

Concernant le fonctionnement proprement dit, le nombre de déran-

Digitized by Google

gements par signal en est du même ordre de grandeur en France qu'en Amérique, tout en étant un peu inférieur dans ce dernier pays.

Concernant les difficultés d'entretien et le soin que nécessitent les appareils, on constate que, d'après les statistiques américaines, l'effectif nécessaire pour obtenir un bon fonctionnement des signaux est cinq fois plus élevé qu'en France (en se basant sur l'effectif d'entretien du bloc des Chemins de Fer du Midi de 1900 à 1914).

Fausses voies libres indues. — Ayant eu connaissance des statistiques américaines, nous avons été très surpris de constater qu'il y aurait sur les installations des Etats-Unis un nombre de « fausses voies libres indues », considérable et qui ne serait jamais toléré à beaucoup près, à juste titre, par un réseau français.

Pour concrétiser ce fait, nous signalerons que si on appliquait à un bloc automatique de Paris à Vintimille les résultats des statistiques américaines, on trouverait qu'il se produirait par an 55 voies libres indues en prenant la moyenne des statistiques que nous possédons.

Ceci, à notre avis ne peut provenir que des diverses causes que nous avons signalées au cours de l'exposé qui vient d'être fait (caractéristique des relais employés en Amérique : moteurs de signaux à déviirage-bloc avec relais à 3 positions).

Il nous a semblé intéressant de préciser ces points qui font ressortir la valeur des installations françaises, et qui permettent d'affirmer que si, au point de vue quantités de signaux en service, notre pays ne peut supporter la comparaison avec l'Amérique, en revanche, pour ce qui est de la qualité et de la conception des installations, la supériorité des installations françaises ne semble guère discutable.

Nota. — Il y a lieu de signaler que les statistiques françaises sont établies d'après le nombre de *trains signaux*, tandis que les statistiques américaines sont établies d'après le nombre de *mouvements de signaux*. Les signaux américains étant en général à trois positions, chaque « train signal » dans ce cas correspond à trois « mouvements de signaux » sans compter les manœuvres.

Digitized by Google

Digitized by Google

COMPARAISON ENTRE LE COURANT CONTINU ET LE COURANT ALTERNATIF

par M. Mathivet.

Ingénieur en chef des Travaux du jour aux Mines de Vicoigne, Nœux et Drocourt.

L'auteur recherche les raisons qui, depuis quelques années ont remis en faveur le courant continu pour la transmission de l'énergie.

Il rappelle les divers procédés employés pour transformer le continu en alternatif et inversement (M. Leblanc, Thury, Highfield). Il fait ressortir les avantages du moteur continu pour la traction électrique, l'extraction minière, la grosse métallurgie, l'électrolyse, l'électro-culture, l'éclairage.

A. — Généralités

Il y a une huitaine d'années, lorsqu'il s'est agi de reconstituer les régions dévastées par la guerre et lorsque le problème de l'économie du charbon s'est posé devant nous avec un nouvel intérêt, plusieurs Ingénieurs ont étudié à fond les avantages respectifs de l'emploi du courant continu et des courants alternatifs pour résoudre les problèmes considérés.

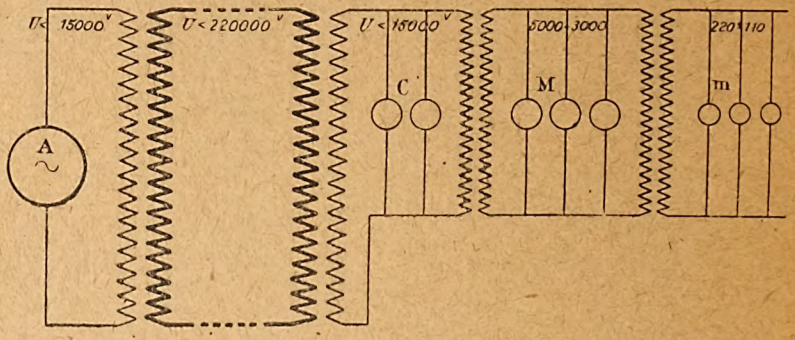
Les Revues Techniques de 1919 et principalement la *Revue Générale de l'Electricité* ont publié, à ce sujet, des articles très complets de M. Bunet, pour la question du transport de force et de M. Mauduit, pour la question de la traction électrique.

Il nous a semblé qu'il était intéressant, après huit années de travaux intensifs dans tous les domaines de l'application de l'électricité industrielle, de voir si les idées ou si les solutions qui avaient été préconisées en 1919 et qui pour la plupart ont été réalisées, sont bien des solutions définitives et si la pratique a consacré leur succès.

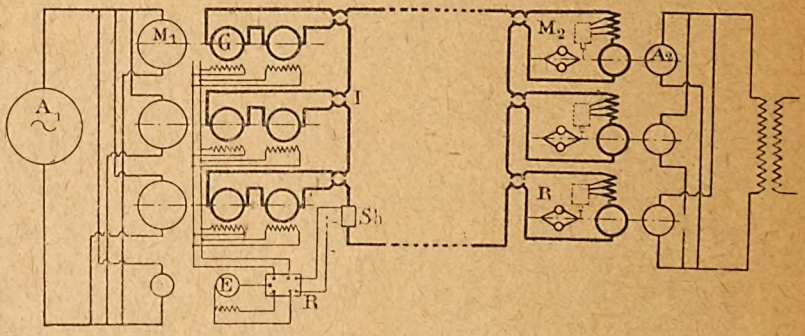
Alors, en effet, qu'il semblait définitivement acquis, que dans le domaine de la transmission de l'énergie, les courants alternatifs l'emportaient de beaucoup sur le courant continu et que dans le domaine de la traction électrique, la prédominance devait légitimement revenir au courant continu, nous avons vu cependant depuis quelques années, ce dernier reprendre de la faveur pour la transmission de

Digitized by Google

TRANSPORT D'ENERGIE PAR COURANT ALTERNATIF HAUTE TENSION



TRANSPORT D'ENERGIE PAR COURANT ALTERNATIF
COMBINÉ AVEC LE COURANT CONTINU HAUTE TENSION



TRANSPORT D'ENERGIE PAR COURANT CONTINU HAUTE TENSION

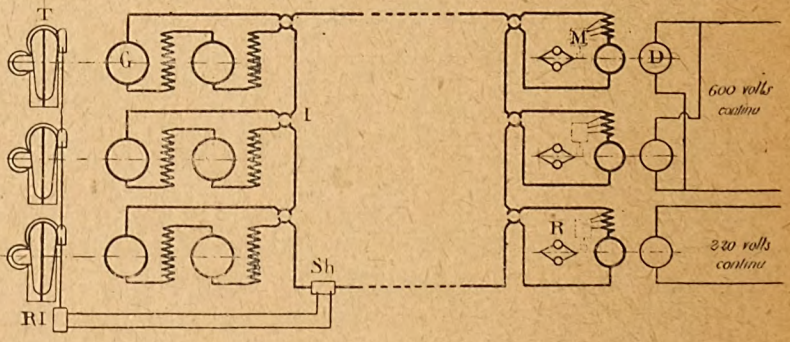


Tableau I.

A alternateurs.
C générateurs synchrones.
G génératrices.
I interrupteurs de court-circuit.
M moteurs HT.
m moteurs BT.
M_1 groupes moteurs synchrones.
M_2 groupes moteurs série.
R régulateurs.
T turbines.

Digitized by Google

l'énergie à longue distance, tandis que le courant alternatif était utilisé de plus en plus pour la traction électrique : il nous paraît donc intéressant de rechercher quelles sont les raisons de ce chassé-croisé et d'une manière plus générale de voir dans quelle mesure on doit préférer l'une des deux sortes de courant à l'autre.

Nous avons résumé dans le 1er tableau synoptique que nous joignons au présent rapport, les différentes applications des courants alternatifs et du courant continu ; les courants alternatifs peuvent s'employer, tantôt sous forme de courant triphasé, tantôt sous forme de courant monophasé, ils peuvent également affecter plusieurs formes de fréquences ; savoir :

15, 25, 50, 60 p : s.

Nous savons que lorsque l'on veut employer le courant alternatif en matière de traction électrique, il faut employer des basses fréquences, tandis que pour la lumière et les usages ordinaires, les fréquences élevées sont préférables.

Toutefois, il est arrivé qu'en présence de l'intérêt de l'unification des fréquences et de l'interconnexion nécessaire des réseaux dans un même pays, les partisans des courants alternatifs se sont ralliés en Europe à la fréquence de 50 périodes et ceci a pour ainsi dire entraîné l'adoption de l'emploi du courant continu pour la traction électrique, ce courant continu étant alors obtenu en transformant les courants alternatifs primaires, soit dans des commutatrices, soit dans des groupes moteurs génératrices, soit dans des redresseurs à vapeur de mercure, soit enfin dans l'appareil très original connu sous le nom de *transverter* de Highfield.

Cet appareil qui fut inventé en 1918 par M. Highfield, fut exposé à Londres en 1924.

Le principe du *transverter* est connu :

Il consiste à recevoir du courant alternatif triphasé dans des transformateurs statiques, comportant primaire et secondaire ; puis à multiplier les phases des primaires, ce qui multiplie également les phases des secondaires ; enfin à relier les phases ainsi multipliées des secondaires à un collecteur de dynamo, autour duquel tournent des balais collecteurs ; ces balais sont entraînés par un moteur synchrone et peuvent capter des courants continus, ayant une tension égale à la tension maxima des courants alternatifs des secondaires des transformateurs.

La multiplicité des phases des enroulements primaires est obtenue par des combinaisons d'enroulement dans ces phases, de telle sorte

Digitized by Google

que les trois phases primaires donnent naissance à trente-six nouvelles phases décalées de 10°, les unes par rapport aux autres.

On peut ainsi arriver à recueillir des courants continus à plus de 100 000 V et à constituer des *transverters* d'une puissance de 5 000 kW.

On voit que si l'on veut réaliser avec cet appareil un transport de force à courant continu à haute tension, il suffira d'employer par exemple, une vingtaine de ces appareils pour obtenir 100 000 kW. Par contre, si l'on veut se contenter d'utiliser le courant continu à basse tension, on peut toujours le faire.

On retrouve dans cet appareil les idées directrices qui avaient guidé jadis M. Maurice Leblanc dans la construction de son *panchahuteur*.

Dans les pays, où malgré l'unification des fréquences, les réseaux de traction électrique sont restés en courant alternatif à basse fréquence, ces réseaux ont pour la plupart leur Centrale spéciale, en général hydraulique et constituent ainsi des îlots parfaitements autonomes et isolés.

D'ailleurs, et dans les pays où la chose était possible, c'est-à-dire dans les pays montagneux ou lacustres, pays où il était très facile d'installer des Centrales hydrauliques spécialement affectées à un usage déterminé, on a généralisé l'emploi de la traction électrique en courant alternatif à basse fréquence et comme on s'est aperçu rapidement que le courant alternatif monophasé offrait de grands avantages de simplicité sur le courant alternatif triphasé, on a abandonné ce dernier courant pour l'électrification de certains chemins de fer, et on lui a préféré le courant alternatif monophasé à 16,2/3 p : s : c'est le cas de l'Autriche, la Suisse, la Bavière, la Suède, la Norvège et certaines contrées de l'Amérique du Nord.

Seule l'Italie est restée fidèle aux courants alternatifs triphasés pour ses lignes de traction électrique.

En ce qui concerne les lignes de transport d'énergie, il semble bien que, pour longtemps encore, les courants alternatifs restent la solution générale et il faut leur rendre cette justice que, malgré les défauts nombreux que présente leur emploi, ce sont eux qui ont permis de progresser d'une manière considérable dans l'électrification de nos pays, en se prêtant d'une manière très simple à l'unification des tensions de transport et à l'unification des tensions d'utilisation.

Il serait, en effet, tout à fait injuste de ne pas reconnaître que, c'est grâce à son extrême simplicité que le moteur asynchrone a pu se multiplier dans nos usines et permettre ainsi à l'électricité de conquérir des domaines qui jusqu'alors lui étaient inconnus.

Digitized by Google

D'ailleurs, dans cette conquête, le moteur asynchrone a été puissamment aidé par l'égale simplicité et l'extrême souplesse des transformateurs statiques : la possibilité, en effet, de réaliser avec ces appareils, n'importe quelle puissance et n'importe quelle tension, ont permis de les installer dans n'importe quel endroit, soit même d'une manière absolument rustique et en leur associant des moteurs asynchrones, on a pu généraliser très rapidement l'emploi de réseaux à courants alternatifs offrant toutes les gammes de tension depuis 110 V jusqu'à 15 000 V.

Toutefois, cette extension de l'emploi des transformateurs statiques et des moteurs asynchrones s'est faite au détriment du rendement général de ces installations et de la mauvaise utilisation des stations génératrices, par suite du décalage inévitable que ces appareils produisent entre la tension de distribution et le courant d'utilisation.

Nous savons tous, en effet, que la question du facteur de puissance est loin d'être résolue et que les phénomènes perturbateurs qui se produisent sur les lignes de transport d'énergie à courants alternatifs, deviennent d'autant plus fréquents et d'autant plus nuisibles que la tension de transport ainsi que l'intensité du courant sont de plus en plus élevées.

Il semble que l'on soit arrivé maintenant à l'extrême limite que la pratique puisse admettre, en adoptant des tensions de 100 000 et 200 000 V et des intensités de 300 à 500 A, et la puissance de 100 000 kW paraît rester, jusqu'à nouvel ordre, une puissance que l'on ne pourrait pas dépasser.

Ceci explique, que par exemple, au Transwaal, on étudie en ce moment, une ligne de transmission d'énergie dont l'artère centrale serait parcourue par du courant continu haute tension.

Ce sont donc les idées de M. Thury qui semblaient depuis longtemps reléguées dans l'oubli, qui reviennent à l'ordre du jour et il faut reconnaître que, si cette solution est pratiquement réalisable, elle sera de beaucoup supérieure à la solution par courant alternatif. L'expérience du transport de force de Moutier à Lyon, en France, a été, en effet, couronnée par le succès et malgré les critiques que l'on peut adresser à l'emploi de ce système, les Ingénieurs du Transwaal, ont l'intention de réaliser une ligne constituée de la manière suivante :

Station génératrice avec turbines hydrauliques et alternateurs, les alternateurs alimentant à côté d'eux des moteurs synchrones de grosse puissance, chacun de ces moteurs synchrones actionnant une ou plu-

Digitized by Google

sieurs dynamos à courant continu, connectées en série entre elles et avec les dynamos des groupes voisins ; on peut ainsi atteindre une tension de transport d'énergie de 200 000 à 300 000 V étant entendu que sur le parcours de la ligne, aucun prélèvement ne sera fait. Pour des intensités de 300 à 500 A, ceci permettrait de transporter des puissances pouvant aller jusqu'à 150 000 kW sans avoir les inconvénients du courant alternatif.

A l'extrémité de la ligne de transport d'énergie, des moteurs à courant continu, disposés en série, seront embranchés sur la ligne, ces moteurs actionnant des alternateurs distribuant l'énergie locale, sous forme de courant alternatif.

Nous avons figuré sur le tableau 1, le schéma représentatif de la solution que nous venons de décrire.

Nous avons également figuré sur notre schéma d'ensemble, la solution intégrale du transport en courant continu.

Cette solution ne diffère d'ailleurs de la solution mixte que par la suppression à la station de départ des alternateurs et des moteurs synchrones intercalés entre les turbines et les dynamos à courant continu.

A la station d'arrivée, les moteurs à courant continu, peuvent attaquer indifféremment des génératrices pour la traction électrique ou des alternateurs pour la distribution locale de la lumière et de la petite force motrice.

Nous voyons donc qu'à l'heure actuelle, les idées en matière de transport d'énergie et d'utilisation de courant, sont exactement inverses de celles que nous avons vu adopter depuis une vingtaine d'années ; il n'y a peut-être pas là un fait paradoxal et nous devons plutôt y voir le retour, à une tradition très ancienne, tradition qui voulait en tout état de cause que le courant continu soit la forme la plus logique de l'utilisation de l'électricité dynamique.

Après avoir ainsi rappelé quelle a été l'évolution des concepts en matière de solution générale, nous allons examiner maintenant dans les différentes applications du courant électrique, quels sont les arguments que l'on peut faire valoir en faveur du courant continu ou du courant alternatif.

B. — Applications (*Voir tableau* 2).

a) *Applications mécaniques.*

C'est surtout dans l'application des moteurs électriques à la commande des différents engins de travail, que le courant continu présente, sur le courant alternatif, un avantage marqué.

Digitized by Google

COURANT ALTERNATIF

STATIONS GÉNÉRATRICES

Turbo-alternateurs : Toutes puissances jusque 150.000kw.
Tension jusque 13.500v.

ÉLÉVATION DE TENSION POUR TRANSPORT A GRANDE DISTANCE

Transformateurs statiques : Toutes tensions jusque 220.000v.

TRANSPORT D'ÉNERGIE.

Câbles armés : Jusque 60.000v.
Lignes aériennes : Ttes tensions jusq. 200.000v.
Avantages : Grande puissance transportée.
Transformateurs statiqs pr obtenir les tensions d'utilisation industrles.
Inconvénients : Capacité et self-induction nécessitant de puissants condensatrs synchrones à l'arrivée.

DISTRIBUTION ET UTILISATION.

a) **Ateliers** : Tous les moteurs ordinaires à vitesse sensiblement constante.
Moteurs spéciaux à collecteur pr vitesses variables (délicats).

b) **Traction-Electrique** : Trolley seul. Courant alternatif triphasé direct : 10.000 à 15.000v à 25 pér. ou 16 pér. 2/3 (2 lignes de contact).
Courant alternatif monophasé : 15.000v 16 pér. 2/3
Avantages : Sous-stations très espacées avec transformateurs statiques.
Inconvénients : Freinage en récupération très délicat.
Centrales spéciales pour le monophasé.

c) **Mines** : Moteurs asynchrones ordinaires pr tous usages.
Moteurs synchrones pr gros moteurs et amélior le cosinus du réseau.
Moteurs à collecteurs pr ventilateurs et usages spéciaux.

d) **Métallurgie** : Courant alternatif pour petits moteurs.
Pour laminoirs. Court alternatif peu employé.

e) **Electro-Métallurgie** : Fours à arc : Monophasés et triphasés de toutes puissances.
Fours à induction.
Fours à hte fréquence.

f) **Electro-Chimie** : Courant alternatif inutilisable pr Electrolyse.

g) **Appareils de levage** : Courant triphasé mais avec peu de souplesse.

h) **Electro-Culture** : Courant alternatif pour tous les moteurs.
Facilité de distribution.

i) **Divers** (Télégraphie, Téléphonie, Signaux).
Courant alternatif peu employé.

j) **ECLAIRAGE** : Les fréquences supérieures à 25 pér. sont seules acceptables.

COURANT CONTINU

STATIONS GÉNÉRATRICES.

Turbo-dynamos : Petites puissances.
Tension jusque 5.000v max.

ÉLÉVATION DE TENSION POUR TRANSPORT A GRANDE DISTANCE.

Couplage en série des génératrices.
Transformation de l'alternatif en continu par le Transverter.

TRANSPORT D'ÉNERGIE.

Câbles armés possibles jusqu'à 100.000v.
Lignes aériennes possibles jusqu'à 300.000v.
Avantages : Capacité et self-induction ne gênent pas.
2 fils seulement pour le transport.
Inconvénients : Pertes en lignes constantes. Mauvais rendement à faible charge.
Groupes moteurs générateurs pour obtenir du courant continu à tension constante pour les usages industriels.

DISTRIBUTION ET UTILISATION.

a) **Ateliers** : Tous les moteurs ordinaires à vitesse constante ou variable.

b) **Traction-Electrique** : Trolley : Tension jusque 3.000v.
Sous-station de transformation. Avec moteurs génératrices dans le cas de distribution continue série.
Sous-station de transformation : Avec commutatrices ou redresseurs dans le cas de distribution triphasée.
Avantages : Freinage facile par récupération.
Inconvénients : Sous-stations très rapprochées.
Accumulateurs : Locomotives à accumulatrs au plomb (Ironclad) au fer nickel (Saft).

c) **Mines** : Pour les usages courants : Moteurs à courant continu alimentés par groupe convertissr. Pr machines d'extraction. Système Ward Léonard.

d) **Métallurgie** : Courant continu pour petits moteurs.
Laminoirs : Le courant continu est préférable.

e) **Electro-Métallurgie** : Fours à arc seulement.

f) **Electro-Chimie** : Electrolyse par courant continu à basse tension.

g) **Appareils de levage** : Le courant continu est préférable.

h) **Electro-Culture** : Courant continu pour tous les moteurs.

i) **Divers** (Télégraphie, Téléphonie, Signaux).
Courant continu presque toujours employé.

j) **ECLAIRAGE** : Courant continu très employé.

Digitized by Google

Il est, en effet, intéressant quel que soit l'outil que l'on a à commander, de pouvoir à volonté faire varier la vitesse de cet outil ; or, il faut reconnaître que les différents moteurs à courant alternatif ne se présentent pas à ce sujet sous un jour favorable, tandis que par l'emploi de rhéostats appropriés, placés soit sur l'induit, soit sur les inducteurs du moteur à courant continu, on peut toujours obtenir une variation de vitesse relativement grande.

Si donc, d'une part, le moteur à courant alternatif présente moins de difficulté d'exploitation, par suite de l'absence de collecteur, le moteur à courant continu, malgré la servitude de la surveillance des balais, présente plus de souplesse que son concurrent.

C'est ce qui a amené beaucoup d'ingénieurs à installer, dans leurs usines, des appareils de transformation leur permettant d'utiliser le courant alternatif fourni par les réseaux primaires, sous forme de courant continu.

Ils préféraient subir une perte de rendement plutôt que de s'astreindre à avoir des organes mécaniques de changement de vitesse.

D'ailleurs, tout compte fait, il n'est pas certain que le rendement total d'une installation mixte dotée de convertisseurs, de commutatrices ou de redresseurs à vapeur de mercure et d'un ensemble de moteurs à courant continu, soit inférieur au rendement total qu'aurait cette même installation, si on l'avait réalisée uniquement en courant alternatif.

L'ensemble de tous les moteurs asynchrones qu'il aurait fallu mettre sur les engins commandés, aurait provoqué des pertes importantes dans les transformateurs d'alimentation et dans tout le réseau basse tension desservant ces moteurs ; à ces pertes purement électriques seraient venues s'ajouter les pertes provenant des transmissions mécaniques destinées à corriger la rigidité de la vitesse qui est la cause principale d'infériorité des moteurs asynchrones.

Nous savons bien que l'on va nous opposer l'emploi des moteurs à courant alternatif spéciaux, qui peuvent donner des vitesses variables, grâce aux collecteurs dont on les a munis.

Mais les partisans de ces sortes de moteurs, sont-ils bien certains d'avoir le droit de les appeler des moteurs à courant alternatif et quels que soient les noms qu'on leur donne (moteur à répulsion, moteur série compensé, moteur à calage variable), nous prétendons que ces soi-disant moteurs à courant alternatif ne sont pas autre chose que des moteurs à courant continu déguisés.

C'était grâce à l'adjonction du collecteur inventé par Gramme, col-

Digitized by Google

lecteur qui a justement pour but de redresser le courant alternatif circulant dans l'un des enroulements du moteur, que nous pouvons obtenir des vitesses variables, dans des moteurs normalement alimentés par du courant alternatif, en provoquant des compositions de flux et de courants qui sont tantôt alternatifs et tantôt continus.

Si nous avons classé ces moteurs à collecteur dans notre tableau, dans la colonne du courant alternatif, c'est par une sorte de concession à la routine, mais en réalité ce sont des moteurs mixtes et leur emploi n'est pas autre chose qu'un hommage indirect rendu au courant continu.

Il faut reconnaître d'ailleurs que certains de ces moteurs mixtes ont été réalisés d'une manière remarquable, et nous croyons que le succès que nous constatons actuellement de la traction électrique par courant alternatif monophasé, provient uniquement de la supériorité sur tous les moteurs du même genre, des moteurs monophasés à collecteur et à calage variable des balais, qui ont été lancés sur le marché depuis une quinzaine d'années ; ces moteurs sont connus sous le nom de moteurs monophasés Deri-Brown-Boveri.

Mais nous persistons à considérer ces moteurs, comme des moteurs à courant continu, dans les inducteurs desquels on injecte du courant alternatif.

Ces moteurs à courants alternatif et continu ou *mixtes* se sont montrés suffisamment souples pour que, non seulement, on puisse les employer en matière de traction, mais aussi pour qu'on puisse les employer en matière d'extraction minière ou dans l'industrie métallurgique.

Il semble donc que pour les trois applications les plus importantes de l'industrie, c'est-à-dire la *traction électrique*, *l'extraction minière* et la *grosse métallurgie*, les courants alternatifs doivent être définitivement rejetés, les seuls genres de moteurs pouvant être appliqués dans ces conditions étant, soit de véritables moteurs à courant continu, soit des moteurs mixtes monophasés à collecteur.

Toutefois, même pour les commandes des trains de laminoirs, étant donné qu'il faut, dans ce cas, des moteurs de 15 000 ch, le courant continu proprement dit devra être préféré, car jusqu'ici, malgré son extrême souplesse, le moteur à courant monophasé pour grosse puissance n'a pu être encore réalisé.

Nous n'ignorons pas qu'il existe des installations, principalement dans les mines, dans lesquelles les treuils d'extraction sont commandés par des moteurs à courant alternatif : mais, d'une part, on est tou-

Digitized by Google

jours obligé de passer par l'intermédiaire d'un train d'engrenage et, d'autre part, les difficultés que l'on rencontre pour le réglage des résistances sur le rotor et pour l'inversion du courant sur les stators sont telles que l'avantage de l'emploi des moteurs à courant continu leur fait, dans la plupart des cas, donner la préférence.

Il y a toutefois, un genre de moteur à courant alternatif dont l'emploi est venu corriger, dans la mesure où la chose était possible, les défauts inhérents à l'emploi généralisé du courant alternatif ; ce sont les *moteurs synchrones ;* on sait tout le secours que ces moteurs peuvent donner, tant sur les lignes primaires comme condensateurs synchrones, que sur les lignes secondaires à seule fin de relever le facteur de puissance des installations à courant alternatif.

On peut arriver, en effet, en multipliant ce genre de moteurs, à annuler presque complètement le décalage du courant d'utilisation sur la tension et par cela même diminuer considérablement les pertes dans les transformateurs et dans les lignes.

Un exemple très intéressant de l'application des moteurs synchrones, pour obtenir un cosinus égal à l'unité dans un réseau particulier, est celui du bassin houiller du Nord de la France.

La plupart des Compagnies Houillères du Nord et du Pas-de-Calais ont, en effet, adopté le moteur synchrone, soit pour commander directement les convertisseurs des machines d'extraction électriques du système Ward Leonard, soit pour être adjoint à ce convertisseur comme condensateur synchrone, lorsque ce convertisseur avait été prévu avec moteur asynchrone.

Mais on peut alors se demander si, au lieu d'avoir une installation à courant alternatif, comportant un très grand nombre de ces moteurs synchrones, il ne conviendrait pas mieux, pour tous les moteurs d'une même usine, ou pour tous les moteurs d'un même îlot suffisamment concentré, d'employer dans chaque usine, ou dans chaque îlot, des moteurs à courant continu alimentés, soit par des commutatrices, soit par des redresseurs à vapeur de mercure ou mieux par des convertisseurs rotatifs, dont la génératrice à courant continu serait commandée par un moteur synchrone de grande puissance.

La question du facteur de puissance ne se poserait plus ni pour le réseau secondaire, ni pour le réseau primaire, et elle serait résolue par le seul fait de l'emploi d'un moteur synchrone puissant.

Examinons maintenant quelle est la part que l'on peut faire à l'une ou à l'autre sorte de courant dans les différentes industries d'importance secondaire, susceptibles d'employer l'électricité.

Digitized by Google

Dans l'électro-métallurgie, le courant alternatif présente de gros avantages, car l'on tend de plus en plus à abandonner les fours à arc pour prendre les fours à induction.

Par contre, il y a toujours des dispositions spéciales à adopter pour réduire dans la mesure du possible le décalage du courant.

A cet effet, les conducteurs d'amenée de courant aux cuves des fours électrométallurgiques sont entremêlés pour réduire au minimum les effets de self-induction ; de plus, le calcul des transformateurs d'alimentation des fours, est fait de manière à réduire au minimum le courant à vide de ces transformateurs.

En ce qui concerne l'électro-chimie, le courant continu reprend l'avantage pour les installations d'électrolyse.

Nous signalerons comme installation très intéressante d'électrolyse à courant continu, celle des usines de zinc de Anaconda qui représente une puissance de plus de 30 000 kW.

Cette puissance est répartie entre six batteries parallèles de cuves d'électrolyse absorbant chacune 10 000 A sous 550 V, chaque batterie comportant 144 cuves, dans lesquelles on procède à l'électrolyse d'une solution de sulfate de zinc.

Le courant nécessaire est produit par des commutatrices hexaphasées, alimentées elles-mêmes par des transformateurs de 6 000 kVA, recevant le courant du réseau primaire à 100 000 V pour l'abaisser à 400 V, la commutatrice le transformant en courant continu à 580 V.

Il y a en outre comme secours des groupes convertisseurs actionnés par des moteurs synchrones.

Le courant continu est également beaucoup plus avantageux que le courant alternatif dans la commande des appareils de levage, car il s'agit ici de résoudre un problème identique à celui de la traction électrique : couple puissant au démarrage, mise en vitesse rapide, freinage commode, possibilité de varier la vitesse dans des limites assez étendues.

Une nouvelle extension de l'emploi de l'électricité s'est révélée à nous, ces temps-ci, nous voulons parler de l'électro-culture.

Ici, grâce à la facilité de son installation, grâce à la dispersion inévitable de son emploi, le courant alternatif semble, pour le moment, tenir une place prépondérante, mais nous croyons cependant qu'au fur et à mesure de l'extension de l'emploi de l'électricité dans ce domaine particulier, le courant alternatif devra céder peu à peu la place au courant continu et pour les mêmes raisons que celles qui ont été exposées pour les applications de grosse puissance.

Digitized by Google

En effet, si nous admettons que dans les exploitations agricoles on installe un grand nombre de petits moteurs asynchrones alimentés par un nombre également grand de transformateurs, nous allons retomber dans les inconvénients ordinaires de mauvais rendement et de mauvais facteur de puissance et, tôt ou tard, nous serons obligés de recourir aux convertisseurs à moteur synchrone ou aux redresseurs à vapeur de mercure ; pour le moment, où il faut surtout adapter le moteur électrique aux engins de culture, le moteur asynchrone suffit pour défricher en quelque sorte le champ des investigations, mais lorsque les problèmes mécaniques principaux auront été résolus et que la question de l'économie générale du réseau et des appareils se présentera, le moteur à courant continu réapparaîtra avec tous ses avantages.

Il y a d'ailleurs une raison d'ordre secondaire et que nous avons négligé jusqu'ici de produire, mais qui vient cependant aggraver les difficultés déjà grandes de l'emploi du courant alternatif, c'est la question si délicate de l'égale répartition des charges sur les circuits triphasés basse tension ; cette question a déjà fait l'objet de nombreuses études, mais aucune solution générale n'a été indiquée — croyons-nous — et il faut reconnaître qu'aux défauts déjà considérables, du mauvais facteur de puissance, la difficulté de l'égale répartition des charges sur les trois phases des transformateurs, vient encore ajouter une cause du mauvais rendement à nos installations à courant alternatif.

Enfin, en ce qui concerne les applications diverses de la télégraphie, de la téléphonie et des signaux, la supériorité, dans ce domaine du courant continu, n'est plus à démontrer.

b) *Eclairage.*

Nous arrivons maintenant à l'une des applications les plus vulgarisées de l'électricité, celle qui pendant de longues années représenta la seule puissance utilisée des stations centrales, nous voulons parler de l'*éclairage*.

Lorsque l'on a voulu développer les installations en courant alternatif, les transformateurs statiques se sont montrés des outils tellement simples qu'il était tout indiqué de se borner à greffer les lampes sur les circuits secondaires de ces appareils, sans s'occuper de la qualité de la lumière que l'on allait ainsi fournir ; or, deux griefs importants peuvent être faits au courant alternatif employé comme source de lumière :

Digitized by Google

a) Il est impossible de descendre au-dessous d'une certaine fréquence sans fatiguer considérablement les organes visuels.

b) même pour une fréquence acceptable, les variations de tension qui se produisent sur certains réseaux d'éclairage placés dans le voisinage des réseaux de force motrice, sont également très fatigantes à supporter.

Il semble donc qu'il soit à recommander, chaque fois que la chose sera possible, de réaliser l'éclairage d'une grande usine ou d'un îlot de cité, à l'aide de courant continu obtenu, soit par des convertisseurs rotatifs, soit par des redresseurs à vapeur de mercure.

Il semble bien, en effet, que le courant continu fatigue beaucoup moins la vue que le courant alternatif et bien qu'en matière d'éclairage, la question du facteur de puissance ne se pose pas, les avantages physiologiques obtenus par l'emploi du courant continu, dans un cas aussi intéressant pour la majorité de l'humanité, doivent faire pencher la balance en faveur de l'emploi de ce courant.

c) *Accumulateurs.*

Nous avons laissé de côté jusqu'ici ces appareils si intéressants et qui constituent à eux seuls, une nouvelle manifestation des avantages du courant continu.

En effet, il est bien évident que le courant alternatif livré à lui-même, ne saurait nous donner des accumulateurs ; pour constituer ces appareils, on est toujours obligé d'avoir recours à du courant continu et nous savons que, tandis qu'il est absolument impossible d'accumuler du courant alternatif, rien n'est plus simple que d'accumuler du courant continu.

On connaît les nombreuses applications des accumulateurs, mais nous croyons qu'il est intéressant de souligner que, depuis quelque temps, l'accumulateur a encore élargi son domaine en pénétrant dans la grande traction électrique.

On commence, en effet, à construire de puissantes locomotives pour trains de marchandises dont la propulsion s'obtient uniquement à l'aide de batterie d'accumulateurs ; nous citerons en outre pour mémoire les petites locomotives pour traction électrique dans les Mines, les lampes électriques portatives qui, appliquées également aux Mines, ont permis d'augmenter le rendement des ouvriers, tout en leur apportant une sécurité plus grande dans leur travail.

Il y a un domaine dans lequel on cherche à nouveau à utiliser sur la plus grande échelle possible les accumulateurs, c'est celui des auto-

Digitized by Google

mobiles et en présence de la diminution progressive de nos approvisionnements en pétrole, les constructeurs d'automobiles se montrent de plus en plus disposés à vulgariser l'automobile à accumulateurs.

Nous vous avons déjà indiqué, il y a deux ans, que deux types principaux d'accumulateurs se disputaient le marché : l'accumulateur fer nickel et l'accumulateur au plomb ; le premier semblait, jusqu'à ces derniers temps, avoir la suprématie sur le marché ; mais les partisans de l'accumulateur au plomb ont réagi vigoureusement et on peut dire que l'accumulateur connu sous le nom de « Ironclad », offre tout autant de garantie de solidité, que l'accumulateur au fer nickel et comme l'accumulateur au plomb, a toujours montré plus de souplesse que l'accumulateur au fer nickel, il semble bien que pour longtemps encore les deux sortes d'accumulateurs seront employés.

C. — Conclusion.

Nous voudrions, pour conclure ce parallèle un peu court, jeter un coup d'œil d'ensemble sur toutes les applications possibles de l'électricité et dégager de l'examen de ces applications, un enseignement pour l'avenir.

Toutefois, en présence de l'immense développement pris par les installations en courant alternatif, en présence de la politique d'unification des tensions qui a été décidée en France, il y a huit ans, il nous paraît assez difficile de pouvoir revendiquer maintenant, pour le courant continu, une place au moins égale à celle de son concurrent.

Tout en réservant nos pronostics, pour les lignes de transport de force à très haute-tension et en souhaitant même qu'il soit fait une part au courant continu dans les grandes transmissions d'énergie, restant à réaliser en France, nous pourrons, croyons-nous, conclure ainsi :

Chaque fois qu'il s'agira d'une application vulgaire de l'électricité, et chaque fois qu'il s'agira de défricher un champ d'action jusque là vierge, il sera plus simple de faire appel au courant alternatif, ce qui ne veut pas dire que ce sera plus économique.

Mais, chaque fois que l'on voudra opérer un travail délicat, demandant à la fois de la souplesse et de la précision, il faudra revenir au courant continu par des transformations appropriées, en choisissant, dans chaque cas, la solution la plus économique pour ces transformations ; une fois que l'on aura transformé les courants alternatifs primaires en courant continu d'utilisation, il ne faudra pas craindre de développer au maximum les applications du courant continu qui sera

Digitized by Google

ainsi considéré comme un auxiliaire indispensable du courant alternatif, c'est-à-dire un auxiliaire capable de redresser les erreurs et les faiblesses inhérentes à la nature même du courant alternatif, le courant continu n'étant pas autre chose d'ailleurs que du courant alternatif amélioré.

Nous nous excusons de ne pouvoir faire franchement pencher la balance dans un sens, ni dans l'autre, mais ceci nous prouve, une fois de plus, qu'il n'y a pas, pour nous autres humains, de vérité intangible et que nous devons toujours nous contenter d'un médiocre à peu-près.

Nous ne voudrions pas terminer ce rapport sur une impression trop pessimiste, en ce qui concerne le courant alternatif et je crois que la téléphonie sans fil s'est chargée, depuis quelques années, de réhabiliter les courants alternatifs.

Le jour n'est peut-être pas très éloigné où après avoir servi à la transformation des sons, les appareils de production de haute-fréquence, en rayonnant à travers l'espace des ondes de plus en plus puissantes, nous permettront, avec ces ondes mêmes de transformer l'énergie électrique dispersée dans l'espace, en énergie mécanique et ceci grâce à des appareils récepteurs, peut-être très différents de ceux que nous connaissons.

Sans vouloir anticiper sur l'avenir, nous savons déjà qu'il est possible, en plaçant des tubes de verre remplis de gaz rares, dans des champs électriques à haute-fréquence, de produire la lumïnescence de ces tubes sans le concours d'aucun conducteur.

Pourquoi ne pas supposer qu'il sera possible de produire des ondes à haute-fréquence capables de mettre, non plus des gaz, mais des engins électriques, en vibration suffisante pour que ces engins électriques accomplissent un travail mécanique ?

C'est sur cette hypothèse séduisante que nous terminerons notre comparaison.

Digitized by Google

Digitized by Google

LES SYSTÈMES FRANÇAIS MODERNES D'HORLOGERIE ELECTRIQUE

PAR M. GOSSELIN

Ingénieur des P. T. T.

SOMMAIRE

I. — *Défauts des systèmes primitifs.*
II. — *Généralités sur les systèmes modernes. — a) Productions des efforts mécaniques. — b) Contacts. — c) Piles. — d) Avantages généraux des systèmes d'horlogerie électrique.*
III. — *Pendules astronomiques de haute précision.*
IV. — *Distribution d'énergie. — Généralités. — A. Pendules mères. — B. Systèmes de contacts inverseurs. — C. Réceptrices à avances intermittentes. — D Réceptrices à pendules synchrones. — E. Systèmes sans contacts et sans piles. — F. Pendules-mères secondaires et pendules relais. — G. Remise à l'heure d'un ensemble de réceptrices pas à pas. — H Remise à l'heure d'une installation de pendules synchronisées. — I. Remise à l'heure automatique par T. S. F. — J. Comparaison des différents systèmes.*
V. — *Pendules indépendantes d'appartement. — Généralités: — A. Description des systèmes actuellement exploités. — B. Effets de sonnerie.*
VI. — *Applications diverses.*
Bibliographie.

I. — DÉFAUTS DES SYSTÈMES PRIMITIFS.

Les commodités données par l'électricité, et ses effets magnétiques pour la production d'efforts mécaniques aux points précis où ils peuvent être utilisés sont tellement évidentes, que l'idée de les appliquer aux systèmes d'horlogerie a suivi immédiatement la réalisation pratique de l'électro-aimant et des premières piles à dépolarisation, et elle est contemporaine des premiers systèmes de télégraphie.

Comment se fait-il donc que les applications industrielles de l'horlogerie électrique soient si récentes ?

Le système le plus ancien actuellement en service courant en France, date à peine de trente ans et il est lui-même resté seul sur le marché pendant plus de vingt ans, alors que les autres applications de l'électricité, télégraphie, téléphonie, éclairage, force motrice,

Digitized by Google

traction, métallurgie, chauffage, ont connu l'essor et le développement rapide que l'on sait.

Les raisons en sont multiples.

Lorsqu'on ouvre le quatrième tome (consacré à l'horlogerie électrique) du traité de du Moncel sur les *Applications Mécaniques de l'Electricité*, on est saisi d'admiration devant le nombre et l'ingéniosité des systèmes qui ont été imaginés dans toutes les branches de l'électrochronométrie.

Distributions horaires, échappements électriques pour pendules libres de précision, système de sonnerie des heures, des quarts, sonneries à répétitions, réveils, chronographes, etc., les problèmes les plus divers sont résolus d'une multitude de manières, chacune plus élégante et ingénieuse que les autres, et cependant, tous ces dispositifs sont maintenant tombés dans l'oubli.

Mais quand on examine ces systèmes d'un peu plus près, et qu'on les compare à ceux qui sont apparus depuis et qui seuls ont résisté à l'épreuve des applications industrielles et commerciales, on est tout de suite frappé par une différence : tous les anciens systèmes, à présent délaissés, comportent des électro-aimants *non polarisés* alors que tous les appareils modernes qui ont reçu la sanction de la pratique font usage d'électro-aimants *polarisés*, de moteurs *magnéto-électriques*, et d'aimants *permanents* dont les pôles plongent dans une bobine. (L'aimant peut être fixe et la bobine mobile ou vice-versa).

On peut donc dire *a priori* que *l'aimant permanent a sauvé l'horlogerie électrique.*

Ce fait est facile à expliquer lorsqu'on examine attentivement la portée des avantages divers inhérents aux électro-aimants polarisés.

Remarquons tout d'abord l'énormité du nombre d'attractions ou de répulsions que doit accomplir sans défaillance tout système d'horlogerie électrique quel qu'il soit. Ainsi, toute pièce d'horlogerie qui ne fonctionne pas pendant trois ans, au plus bas minimum, sans nettoyage, ni retouche, ne pourra prétendre à la moindre valeur pratique. Pour une pendule à secondes, cette durée de marche correspond à une succession de *cent millions d'attractions* dont les dernières devront être aussi nettes et aussi puissantes que les premières.

Or, si doux que soit le fer de l'armature d'un électro-aimant, il finira toujours, après un tel nombre d'aimantations *de même sens, suivies chacune d'un choc pendant la saturation magnétique* (au moment de l'arrêt sur la butée de travail), par prendre une aimanta-

Digitized by Google

tion rémanente qui empêchera le décollage par le ressort antagoniste. Cet effet fâcheux est d'ailleurs bien connu des télégraphistes, qui le combattent en changeant le sens des connexions des bobines dans un appareil Morse, par exemple, lorsque les traits commencent à coller.

Il ne peut se produire dans les systèmes magnétiques polarisés, où l'armature, quelle que soit sa forme, est soumise à un cycle d'hystérésis complet à chaque période de fonctionnement.

De plus, dans les électros polarisés, le ressort de rappel est supprimé et l'armature est maintenue, dans chacune de ses deux positions de repos, par l'attraction des pôles, attraction qui se change en répulsion aussitôt qu'une nouvelle émission inversée de courant arrive. L'action du ressort *antagoniste* qui, comme son nom l'indique suffisamment, est nuisible pendant la moitié du temps, dans les électro-aimants simples, est ainsi remplacée dans les électros polarisés par une action qui est toujours favorable aux déplacements qu'on désire obtenir.

D'autre part, l'électro-aimant simple est un appareil dont le rendement est désastreux. On ne peut théoriquement dépasser 50 pour cent et en pratique, on peut être heureux lorsqu'on atteint 10 pour cent, si, comme il est nécessaire, on prolonge l'émission de courant pendant une durée suffisante pour que l'armature ait le temps d'arriver franchement à la fin de sa course.

Or, toute perte de rendement se traduit par une augmentation de courant, ce qui a pour effet de surcharger les contacts et d'en amener l'oxydation.

Cette question des contacts est primordiale et a toujours préoccupé à juste titre, les inventeurs d'appareils électriques. On ne l'a surmontée dans les collecteurs des machines à courant continu par exemple, que par les artifices connus pour améliorer la commutation et en admettant des pressions de balai et des pertes par frottement relativement élevées. Elle prend beaucoup plus d'importance dans les systèmes d'horlogerie, car ces appareils ne peuvent mettre en jeu que des efforts, et par suite des pressions très faibles qui ne permettent l'établissement et la rupture que de courants très peu intenses.

La self-induction des électros est aussi très nuisible pour les contacts. Or, il est évident qu'elle est très réduite dans les électros-aimants polarisés où les pièces magnétiques sont presque saturées par l'aimantation permanente, la perméabilité des milieux et par suite la self-induction étant alors peu supérieure à celles de circuits magnétiques sans fer.

Digitized by Google

Une autre raison du peu de succès des premiers systèmes d'électro-horlogerie réside dans le fait, que parmi les auteurs de ces systèmes, il faut distinguer les horlogers qui s'étaient intéressés à l'électricité et les électriciens qui avaient entrepris d'appliquer leurs connaissances à l'horlogerie. Les premiers, soucieux de troubler le moins

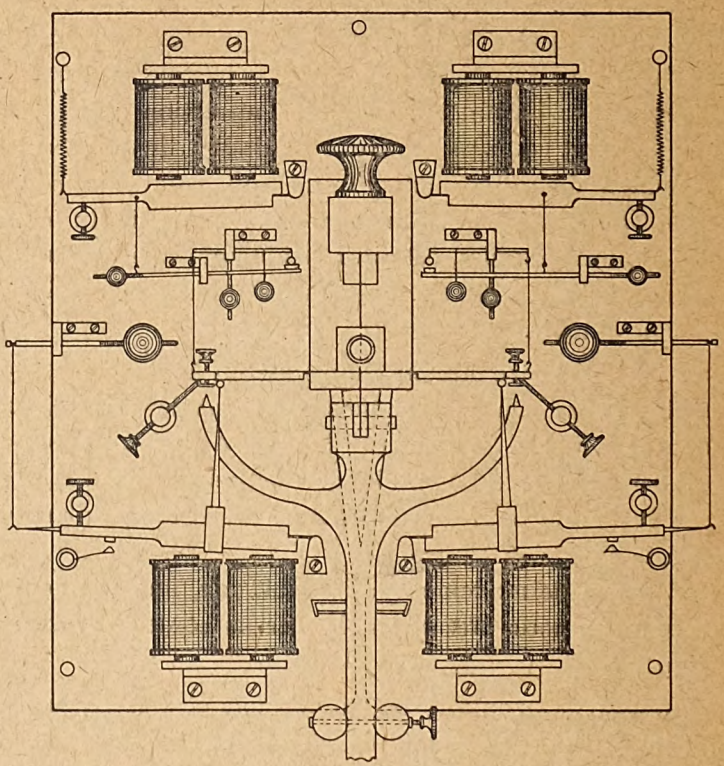


Fig. 1. — Appareil Liais.

possible la marche de leurs pendules, ont presque tous péché par manque de pression sur les contacts et par une réalisation défectueuse des électro-aimants.

Les autres, au contraire, ayant une plus juste idée des efforts nécessaires pour assurer le passage des courants mis en jeu, sacrifièrent l'isochronisme de leurs pendules et, par suite, la régularité des oscillations.

Un des premiers savants non horloger de métier, qui se soit claire-

(1) Les clichés des figures 1, 12 17, 19, 20 sont tirés de *L'Electricité et ses applications à la chronométrie*, par A. Faverger et nous ont été prêtés par le *Journal suisse d'horlogerie et de bijouterie*.

Digitized by Google

ment rendu compte qu'un système oscillant n'est pas nécessairement isochrone fut l'astronome Liais. Malheureusement, ses idées théoriques sur le réglage des pendules le conduisirent à des systèmes d'une réalisation pratique difficile, et d'un fonctionnement durable impossible, ainsi qu'on peut en juger par la figure 1 dont il me semble inutile d'expliquer le fonctionnement tellement la complication est apparente.

Beaucoup d'inventeurs se sont attachés, à adjoindre des systèmes de remontage électrique aux mouvements de l'horlogerie mécanique bien connus.

Ces tentatives partent d'un principe qui me semble insoutenable. L'application de l'électricité à l'horlogerie doit avoir pour but de simplifier au possible les organes mécaniques. Si, pour le seul bénéfice d'éviter le remontage d'une pendule, on double la complexité du mouvement, on accumule les chances de troubles et d'arrêts déjà amplement suffisante avec un mouvement mécanique simple, et on arrive en outre à des prix de revient prohibitifs.

Enfin, si aux considérations précédentes, on ajoute les difficultés qu'on éprouvait au commencement de l'électricité avec les piles à liquide (encombrement, risques de renversement, usure rapide même en circuit ouvert, évaporation, grimpement de sels, etc.) on se rend un compte exact des raisons qui ont éloigné les horlogers pendant si longtemps de tous les systèmes électriques.

Je m'excuse d'un si long prologue, mais j'ai cru devoir maintenir les remarques qui précèdent afin d'indiquer, à ceux qui s'intéresseraient aux problèmes passionnants posés par l'horlogerie électrique, les principes défectueux dont ils devront toujours s'écarter.

II. — Généralités sur les systèmes modernes.

Ayant ainsi indiqué les inconvénients qu'on rencontre dans les applications défectueuses, je vais indiquer les principes généraux sur lesquels on peut baser la réalisation d'un système correct et dégager les avantages qu'on peut retirer de l'emploi judicieux de l'électricité.

a) *Production des efforts mécaniques.*

Les effets mécaniques à obtenir sont de plusieurs sortes. Ils servent, soit à entretenir le mouvement d'un balancier régulateur, soit à produire l'avance des aiguilles d'une réceptrice commandée à distance

Digitized by Google

par une pendule mère, soit à mettre en marche ou à synchroniser un système mécanique accessoire tel qu'une sonnerie, un tambour enregistreur, un balancier synchrone, etc.

Dans les deux derniers cas, la durée et le mode de production de l'effort sont tout à fait arbitraires. Il suffit que cet effort soit suffisant pour vaincre les résistances passives ou utiles qui lui sont opposées, qu'il soit obtenu au moyen d'un circuit dont la self induction soit faible et par un courant, dont l'intensité ne soit pas trop forte pour le contact qui est chargé de l'établir et de le rompre. On fera donc usage, pour toutes les raisons déjà indiquées, soit d'électro-aimants polarisés, soit de moteurs rotatifs à consommation aussi réduite que possible.

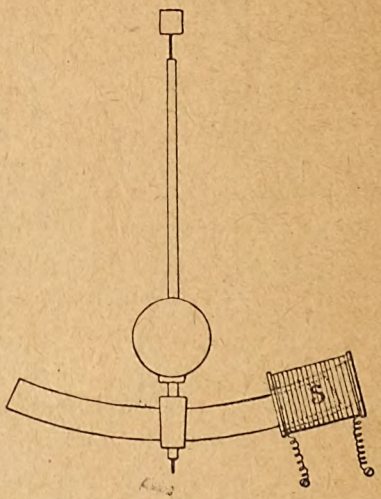


Fig. 2. — Dispositif de Cornu

Pour le premier cas, entretien d'un pendule régulateur, le problème est différent. L'énergie qui doit être restituée à un balancier, si lourd soit-il, pour entretenir son mouvement, est si faible qu'on aura rarement à se préoccuper des contacts, pourvu que le rendement ne soit pas infime ou la self induction énorme. Mais il faut se rappeler que, pour que le pendule conserve ses qualités d'isochronisme, il est de toute nécessité de n'agir sur lui qu'au moment de son passage par la position de repos et pendant un temps aussi bref que possible. Toute autre force qui lui serait appliquée (sauf une force proportionnelle au déplacement ou à la vitesse) détruirait l'isochronisme. On ne pourra donc admettre aucun assemblage dans lequel rentrent des pièces magnétiques, mobiles à proximité d'autres pièces magnétiques fixes, car les attractions se produiraient suivant une loi

Digitized by Google

plus ou moins compliquée qui, de toute façon, détruiraient la régularité de la marche.

On se trouve ainsi réduit à faire usage de l'action sur un aimant permanent d'un circuit ne comportant ni fer doux, ni acier. Ce principe a été mis en œuvre la première fois par le physicien Cornu dans ses travaux sur la synchronisation des pendules.

La figure 2 montre le dispositif qu'il employait et qu'on retrouve sous des formes diverses dans toutes les horloges modernes.

Les inventeurs se sont souvent proposé d'augmenter le champ magnétique de l'aimant afin d'obtenir un rendement meilleur, ce qui les a conduits dans beaucoup de cas à employer des aimants en fer à cheval à la place de l'aimant droit de Cornu. On peut aussi attacher la bobine au pendule et fixer l'aimant. Le principe reste néanmoins le même dans tous les dispositifs.

b) *Contacts.*

La nature et la pression d'un contact doivent être proportionnées à l'intensité du courant, auquel ce contact doit livrer passage.

Les premiers inventeurs de l'horlogerie électrique, insistaient sur la nécessité de faire frotter l'une sur l'autre les deux paillettes de métal précieux, entre lesquelles le contact se produit. Ceci mérite une étude plus approfondie.

Un frottement exagéré va souvent à l'encontre du but qu'on se propose. Si le courant qui traverse le contact entre deux pièces frottantes est considérable, il se produit une série de grippements qui au lieu de nettoyer les pièces, les rendent rugueuses et l'oxyde s'accumule dans les creux.

Ainsi les pièces peuvent glisser l'une sur l'autre mais ne doivent jamais frotter.

Le glissement des pièces de contact n'est d'ailleurs utile que lorsque le courant à couper atteint une dizaine de milli-ampères. D'autre part, le glissement lorsqu'il est nécessaire, ne doit jamais être produit par un va-et-vient des pièces l'une sur l'autre, se produisant de manière que la rupture se fasse au même endroit que la fermeture. En effet, l'instant critique d'un contact est celui de l'établissement. Une fois le courant lancé à travers un contact sans friction, les quelques molécules des deux pièces qui participent au passage du courant se soudent entre elles (sans d'ailleurs qu'aucune résistance mécanique sensible en résulte au moment de la rupture et le contact se maintient parfaitement bon).

Digitized by Google

Si la rupture se fait au même endroit que la fermeture, tout glissement produit un balayage qui amène au point de rupture toutes les poussières et parcelles d'oxyde qui ont été balayées et nuit à l'établissement des contacts ultérieurs.

Le seul glissement admissible est donc un déplacement du point de contact toujours dans le même sens, de manière que la rupture du courant ait lieu à l'extrémité de la course opposée à la fermeture.

En résumé, jusqu'à des courants de l'ordre de 10 milliampères avec des selfs faibles, de l'ordre du dixième d'henry, on obtient d'excellents contacts sans aucun glissement avec des pressions de l'ordre d'un gramme et une rupture aussi brusque que possible.

Pour des courants plus intenses, surtout dans le cas où les circuits

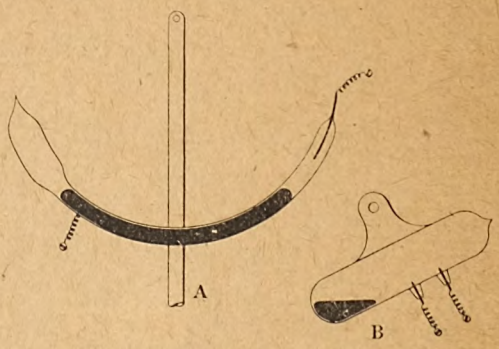


Fig. 3. — Contact à mercure.

comportent des selfs élevées, un glissement continu, toujours dans le même sens, sera utile si la pression ne peut être suffisante pour assurer un contact fixe, mais aucune usure autre que l'usure normale sans courant ne devra être produite.

On peut aussi disposer à côté l'un de l'autre, deux contacts identiques, montés en parallèle et actionnés en même temps. Si parfait que soit le réglage, l'un des deux contacts s'ouvrira un peu après l'autre et lui servira de pare-étincelles.

Je rappellerai simplement pour mémoire les artifices employés pour étouffer les étincelles de rupture (condensateurs, shunts ohmiques, etc...). Ces dispositifs peuvent servir dans le cas de gros courants, mais ils augmentent l'encombrement et le prix de revient des appareils et on peut toujours éviter, au moyen de pendules relais, d'avoir à couper des courants suffisamment forts pour exiger leur emploi.

Digitized by Google

Enfin, on commence à faire usage courant de contact à mercure se produisant dans le vide ou dans un gaz réducteur.

Ces dispositifs indiqués sur la figure 3, permettent de couper avec sécurité de gros courants, mais ils sont encombrants et ne peuvent être employés que dans les pièces de grosse horlogerie.

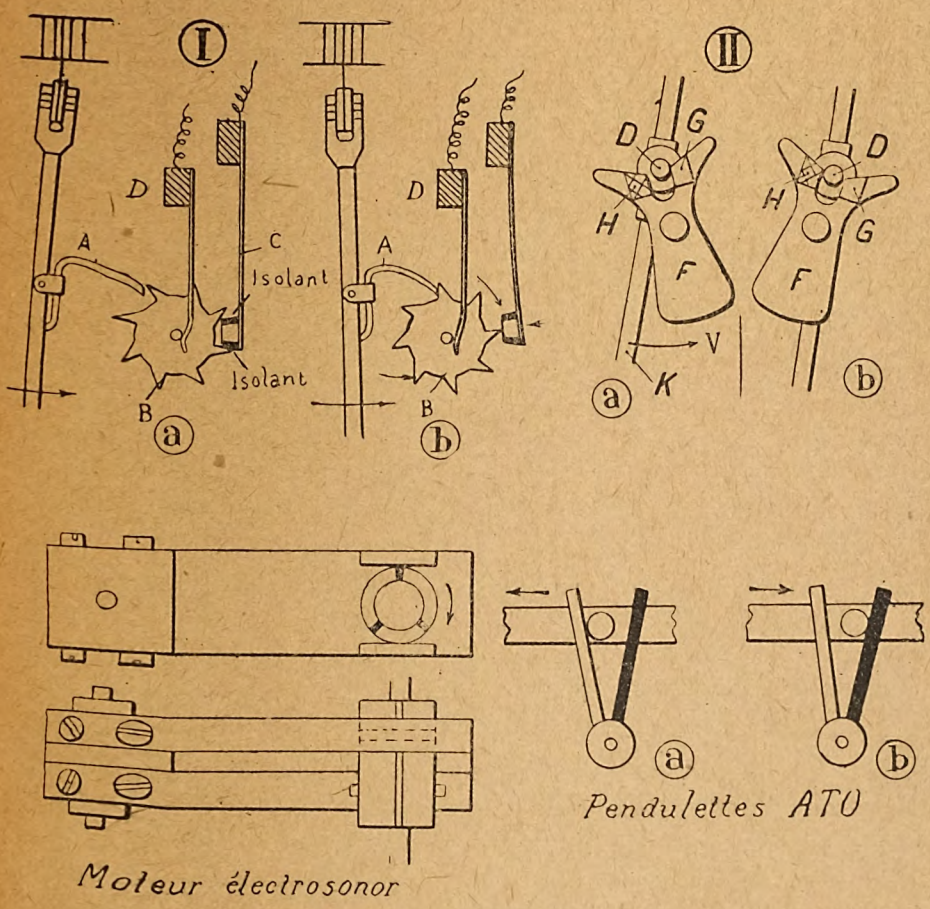


Fig. 4. — Types de contacts.

Les figures 4, montrent quelques exemples de contacts employés dans les systèmes modernes.

c) *Piles.*

La question des piles a été un grand obstacle jusqu'à l'apparition des piles en vases clos et des piles à liquide immobilisé, et jusqu'à la réalisation de systèmes d'horlogerie électrique à très faible consommation.

Digitized by Google

Actuellement, la question est résolue. Un seul élément de 200 cm^3 de capacité suffit à entretenir le mouvement d'une pendule pendant plusieurs années.

La pile Leclanché à liquide immobilisé est couramment employée dans les horloges d'intérieur. La tension fournie sur un circuit de l'ordre de 1 000 ohms est loin d'être constante. Elle varie depuis 1,45 V pour une pile neuve jusqu'à environ 0,8 V tension pour laquelle l'horloge s'arrête. Son prix peu élevé la fait cependant adopter pour les pièces dans lesquelles la haute précision de marche est superflue. Les horloges qui en sont munies doivent alors comporter des corrections d'isochronisme, d'autant plus que les systèmes employés pour les pendules d'appartement exigent généralement des arcs de battement assez grands. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet.

Lorsque la précision de marche est nécessaire (pendules astronomiques, pendules centrales de distributions d'heure), on emploie généralement des piles étanches à liquide libre, préparées avec des produits chimiquement purs et qui reviennent plus chers que les piles sèches, sont plus encombrantes et doivent être tenues verticales, mais leur f. é. m. est presque constante jusqu'à usure complète, à quel moment la tension tombe brusquement.

d) *Avantages généraux des systèmes d'horlogerie électrique.*

Lorsque toutes les conditions de bon fonctionnement sont observées, les avantages apportés par l'application de l'électricité à l'horlogerie sont incalculables.

Pour les pendules de haute précision, on peut supprimer totalement la réaction des rouages sur le pendule et éviter ainsi toutes les irrégularités de marche dues aux imperfections de taille des engrenages, aux épaississements des huiles, aux irrégularités de l'échappement, etc...

D'ailleurs, tout échappement mécanique, si bien combiné soit-il, agit toujours un peu sur le pendule aux extrémités de sa course et trouble ainsi l'isochronisme. L'impulsion qu'il donne au pendule n'est jamais non plus instantanée, et d'ailleurs on ne peut réduire beaucoup sa durée, car la marche trop brusque des pièces en mouvement et des aiguilles produirait des vibrations néfastes de la suspension. Au contraire, l'électricité permet de produire des impulsions motrices de l'ordre du centième de seconde au moyen d'un simple contact de la tête du pendule avec un ressort de force proportionnelle

Digitized by Google

à l'écart de la position d'équilibre, ce qui permet de conserver les conditions théoriques d'isochronisme. On peut même commander la production de l'impulsion par un simple pinceau lumineux, ainsi que l'ont réalisé le Général Ferrié et M. Jouaust. Le pendule est alors rigoureusement libre et fournit une précision incomparablement plus grande que celle des meilleures horloges mécaniques.

L'électricité a aussi donné la solution courante à l'heure actuelle de la distribution et de l'unification de l'heure dans un immeuble, un service étendu ou même dans une ville entière. Le problème de la remise à l'heure par T. S. F. est également résolu. Les efforts actuels tendent à la simplification des systèmes employés dans ce but et on pourra bientôt, au moyen de dispositifs simples dont le réglage et l'entretien seront à la portée de tout électricien moyennement habile, commander les horloges d'un pays entier par un seul pendule astronomique réglé au moyen des mesures de haute précision d'un observatoire. Pour les pendules d'appartement, on obtient grâce à l'électricité, des pièces robustes et très suffisamment précises pour l'usage courant, d'un prix réduit et qui fonctionnent sans remontage ni aucun entretien pendant plusieurs années, au bout desquelles il suffit de remplacer l'élément de pile qui les actionne.

C'est dans ces horloges que la simplification des mouvements est précieuse, car la suppression des barillets et des poids élimine d'emblée les usures des dents, les ovalisations des pivots dues aux pressions des ressorts, les graissages et nettoyages fréquents et enfin les ruptures de ressorts ou de dents de barillet par où finissent toujours les mouvements mécaniques.

Enfin l'électricité se prête à une foule de problèmes plus particuliers, tels que les chronographes de précision, les appareils de contrôle de rondes, les commandes automatiques de sonneries d'usine, etc...

Je vais passer en revue toutes ces applications et décrire plus en détail les divers systèmes actuellement en usage.

Je m'excuse d'avance des omissions que je pourrai commettre et des particularités qui m'auraient échappé dans les descriptions.

III. — Pendules astronomiques de haute précision.

L'introduction de l'électricité dans les pendules de haute précision a pour premier avantage la suppression de l'entraînement direct des rouages par le pendule.

Digitized by Google

Le compteur démultiplicateur qui permet de dénombrer sous forme d'heures, minutes et secondes les oscillations du régulateur devient un accessoire dont le fonctionnement doit être, bien entendu, irréprochable, mais qui ne réagit aucunement sur la régularité des oscillations. Je n'en parlerai donc pas dans ce chapitre et je renverrai au titre IV la description des réceptrices. Je n'envisagerai ici que les systèmes de pendules libres, produisant eux-mêmes l'entretien de leurs oscillations.

Sans entrer dans le détail des démonstrations, je rappellerai que

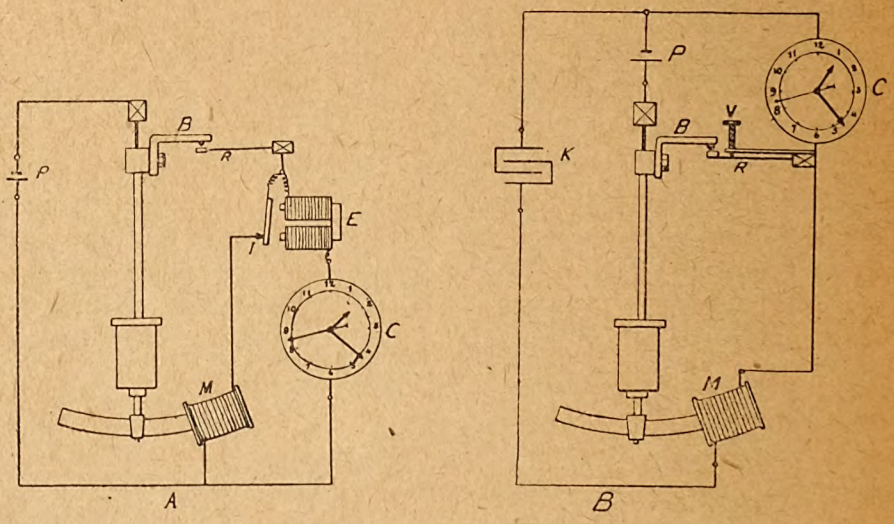


Fig. 5. — Dispositif Gosselin.

les seules forces qui ne troublent pas l'isochronisme du pendule libre sont les trois suivantes :

force proportionnelle à la vitesse instantanée du pendule;

force proportionnelle à l'écart de la verticale;

impulsion instantanée produite au moment du passage à la verticale.

La réalisation d'une force proportionnelle à la vitesse est très difficile, de sorte que pour obtenir un entretien rationnel, on ne peut faire usage que des deux dernières actions.

Les deux dispositifs suivants basés sur ces considérations théoriques ont été imaginés et brevetés en 1917 et en 1924 par mon regretté père, ancien vice-président de la Société Internationale des Electriciens, qui s'est beaucoup intéressé à l'horlogerie électrique et à qui je dois les principes essentiels de cette science.

Digitized by Google

Sur la figure 5 A, le pendule porte un bras B qui vient appuyer au moment du passage par la verticale sur un ressort sans tension initiale et dont la réaction sera par suite proportionnelle au déplacement du pendule.

Au moment où le contact entre B et R se produit, le courant de la pile P se trouve fermé d'une part sur l'électro-aimant E et le compteur C (qui est actionné par un pendule synchrone) et d'autre part, sur la bobine M. Or, aussitôt, l'électro-aimant attire son armature et le contact I est rompu. Le courant qui traverse M est donc extrêmement bref, de l'ordre du centième de seconde, et les conditions d'isochronisme sont respectées.

Dans la figure 5 B, le système de contact est identique. La vis V n'appuie pas sur le ressort R mais est réglée de manière à l'approcher de très près, empêchant ainsi les vibrations de ce ressort lorsqu'il est abandonné par le bras B. On peut aussi employer une vis d'acier légèrement aimantée et très pointue. Elle attire alors le ressort R et assure le contact au moment de son établissement, l'attraction n'est sensible que sur une course de quelques dixièmes de millimètres de sorte que l'action sur le pendule est celle d'un choc très bref sur la verticale.

Quant à l'impulsion motrice, elle se trouve donnée par la charge du condensateur K lors de l'établissement du contact, une impulsion de sens inverse, donc encore favorable au mouvement, étant produite lors de la rupture, par la décharge du condensateur à travers le compteur C.

Ce dernier est parcouru par le courant de la pile pendant la moitié du temps, mais comme l'énergie nécessaire pour son entretien est infime, on peut lui donner une très grande résistance et limiter ainsi la consommation du courant à une fraction de milliampère.

Un pendule de 25 cm pesant moins d'un kilogramme entretenu d'après le dispositif de la figure 5 B donne sans précautions spéciales, une précision de 1/10 de seconde par jour, de l'ordre de celle d'une bonne horloge astronomique.

Avec un balancier battant la seconde, bien compensé et oscillant dans un vide partiel, on arriverait facilement à la précision limite des horloges d'observatoire.

La figure 6 représente un pendule libre dû à M. A. Guilliet, dans lequel les contacts sont du type à mercure dans le vide déjà cités sur la figure 3 A et où l'impulsion instantanée est fournie au pendule par inductions dans le secondaire d'un transformateur, dues à l'établis

Digitized by Google

sement et à la rupture du courant dans le primaire. Une particularité intéressante de ce pendule réside dans la position de l'aimant moteur qui se trouve placé entre les deux masses du pendule à la hauteur du

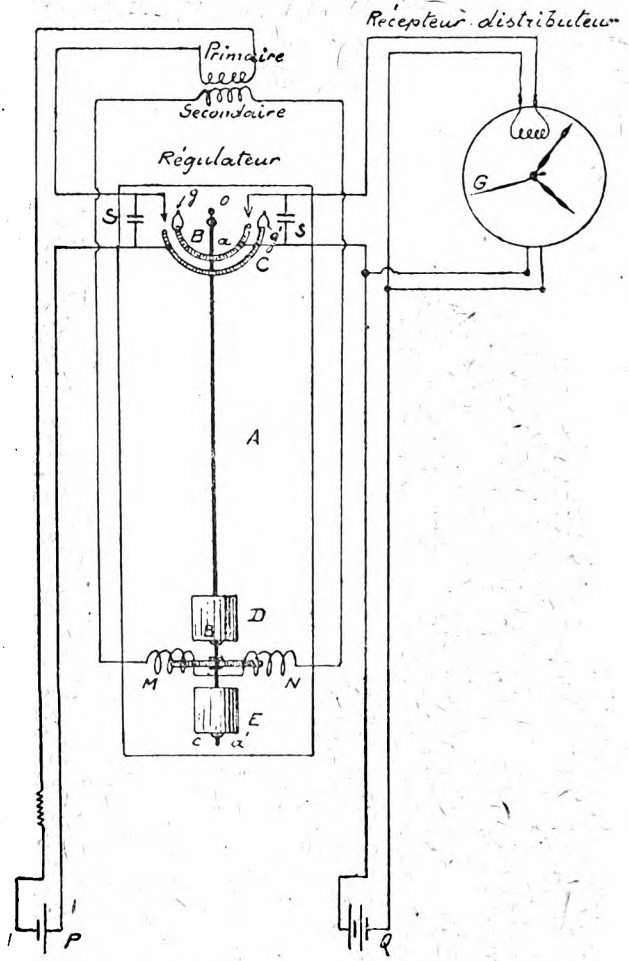


Fig. 6. — Pendule Guilliet.

centre de percussion, de manière à éviter toute réaction balistique sur la tige et la suspension.

La figure 7 indique schématiquement le dispositif réalisé tout récemment par le Général Ferrié et par M. Jouaust, et qui est le plus parfait de tous ceux qui ont été imaginés jusqu'ici.

Le pendule n'est plus soumis à aucune réaction du milieu extérieur autre que le frottement de l'air, qu'on peut d'ailleurs réduire

Digitized by Google

à volonté en enfermant le pendule dans une cage étanche, vide d'air.

Le pendule est muni d'un miroir M sur lequel tombe un faisceau lumineux provenant d'une lampe L. Ce faisceau converge sur un écran E percé d'une fine fente perpendiculaire au plan de la figure et derrière laquelle se trouve une cellule photoélectrique G.

Lorsque le pendule oscille, le spot donné par la lampe L se déplace sur l'écran E et franchit la fente à chaque passage du pendule par la

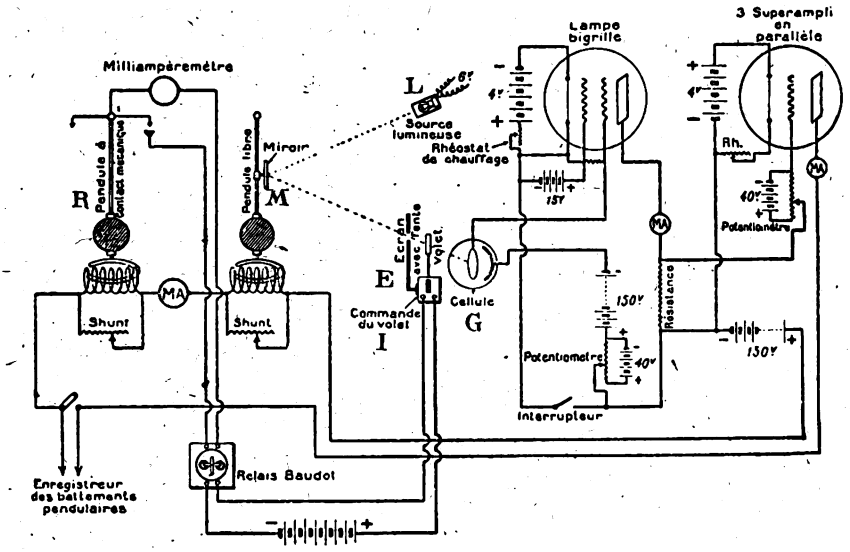


Fig. 7. — Système Ferrié-Jouaust.

verticale. Comme la distance MG est relativement grande, la durée du passage du spot sur la fente est très brève. Il en résulte une émission de courant presque instantanée dans la cellule photo-électrique, émission qui est envoyée, après amplification, dans le moteur du pendule et produit l'entretien.

Le récepteur R est un pendule synchrone qui peut fermer les contacts d'alimentation d'autres réceptrices.

Il actionne aussi un dispositif I qui vient masquer la fente à chaque passage du spot vers le haut par exemple, et laisse au contraire la fente découverte pour les passages en sens inverse. Ceci est nécessaire, en effet, car l'émission photo-électrique étant toujours de même sens et l'impulsion étant motrice pour les déplacements du pendule vers la gauche, par exemple, serait retardatrice si elle se produisait lors du passage vers la droite.

Ce pendule soustrait à toute cause d'erreur donne une précision

Digitized by Google

inconnue jusqu'ici, et qui permettra des progrès considérables dans toutes les recherches où intervient la mesure précise du temps.

Des essais sont actuellement en cours pour la synchronisation rigoureuse et insensible aux parasites de deux installations Baudot reliées par T. S. F. Dans un quadruple Baudot la durée des contacts est de l'ordre du centième de seconde. On conçoit donc que les horloges connues jusqu'ici étaient insuffisantes pour assurer le synchronisme sans correction de deux installations. Avec le nouveau pendule que nous venons de décrire, il sera probablement possible d'obtenir la précision nécessaire.

Je me bornerai à ces quatre exemples de pendules de haute précision, car l'examen de tous les systèmes proposés nous entraînerait trop loin. On pourra en trouver des descriptions dans les divers articles et ouvrages que nous citons dans la bibliographie.

D'ailleurs, la plupart de ces pendules dits de haute précision sont théoriquement défectueux et si avec certains exemplaires on a pu obtenir des marches excellentes, c'est à cause d'un réglage heureux, mais presque impossible à reproduire à volonté. Il faut enfin distinguer entre la régularité assurée par un pendule et la marche moyenne pendant un temps plus ou moins long, qui est souvent citée comme un critérium de précision.

La précision serait théoriquement donnée par l'écart maximum entre les durées de deux oscillations isolées quelconques. C'est d'ailleurs bien cette erreur qui intervient dans les mesures de courts intervalles de temps, où, au moyen d'un oscillographe par exemple, on subdivise en un grand nombre de parties la durée d'une oscillation de pendule.

Or, M. Jouaust a constaté sur de bonnes horloges dont les variations de marches diurnes étaient de l'ordre de 1 seconde, soit une erreur relative *moyenne* de 10^{-5}, que les irrégularités des rouages et des échappements pouvaient couramment donner des *différences de 6 millièmes de seconde* entre deux oscillations de 0,5 sec.

Dans ce cas, la *précision* ne serait que de un millième alors que la marche moyenne pendant une journée pourrait indiquer un millionième.

IV. — Distributions d'heure.

Toute distribution d'heure électrique comporte une horloge mère, actionnant un système de contacts qui permet d'envoyer sur une ligne, des impulsions périodiques de fréquence rigoureusement constante commandant la marche de compteurs horaires.

Digitized by Google

Le problème ainsi posé paraît très simple et lorsqu'on considère les synchronisations obtenues dans la marche des appareils télégraphiques à cadrans, puis des appareils rapides tels que le Baudot ou le Hughes, on est amené à penser que la distribution d'heure aurait dû être résolue depuis longtemps.

En fait, c'est la première application de l'électricité à l'horlogerie qui se soit présentée à l'esprit des chercheurs, mais sa première réalisation correcte ne date pas de vingt-cinq ans.

Les raisons en résident dans plusieurs conditions de fonctionnement, chacune secondaire, mais dont l'observation est essentielle pour que l'entretien d'une telle installation soit moins onéreuse et moins gênante que le remontage et la remise à l'heure de pendules mécaniques.

Nous pouvons répéter ici les remarques déjà faites sur l'emploi d'électro-aimants polarisés, sur les contacts, les consommations de courant, etc...

La suppression du remontage et de l'entretien de l'installation devient un inconvénient si la pendule mère ne possède pas une très bonne marche, car la remise à l'heure qui accompagne tout naturellement le remontage d'une pendule mécanique est ici supprimée et les erreurs de marche de la pendule mère vont en s'accumulant sans cesse et se reproduisant sur tous les cadrans.

Même avec une pendule mère de bonne précision, il est indispensable que le système employé permette une remise à l'heure facile et sûre de toutes les réceptrices et ceci, à partir du poste central où se trouve la pendule mère. Il serait aussi gênant, en effet, de passer dans toutes les pièces d'un service pour remettre les pendules à l'heure que d'y passer pour les remonter.

L'emploi d'électro-aimants polarisés s'impose dans les réceptrices qui fonctionnent pas à pas plus que partout ailleurs, non seulement à cause du rendement, des consommations de courant et du fonctionnement plus sûr, mais aussi pour la raison suivante :

A cause d'un mauvais contact accidentel, d'une secousse subie par la pendule mère pendant une émission de courant ou encore à cause d'une induction intempestive due par exemple à un court-circuit dans une canalisation de force motrice voisine de celle de la distribution d'heure, les émissions peuvent se trouver hachées. Avec un électro-aimant simple, cette émission multiple comptera pour plusieurs et tous les cadrans auront avancé de plusieurs pas au lieu d'un seul. Les plus sensibles auront pu obéir plusieurs fois aux interruptions,

Digitized by Google

les moins sensibles auront eu une marche correcte ou bien n'auront pas été actionnés du tout. On se trouvera ainsi devant un désaccord complet entre les différentes réceptrices, et le seul remède sera la remise à l'heure individuelle de chacune.

Au contraire, avec des électro-aimants polarisés, un contact haché ou doublé n'aura d'autre effet que d'assurer en plusieurs fois un déplacement unique et correct de l'armature. L'effet d'une induction étrangère pourra être de faire avancer d'un pas supplémentaire toutes les réceptrices, mais le désaccord avec la pendule mère sera facile à corriger à partir du poste central. Il suffira de couper la ligne influencée, pendant une émission, pour rétablir l'accord.

Je parlerai aussi plus loin des systèmes de distribution d'heure par pendules synchrones, qui permettent d'éliminer complètement les influences des contacts multiples ou défaillants, des inductions et qui réduisent les consommations de courant à des valeurs invraisemblablement petites. Ces systèmes relativement récents ne sont pas encore très répandus. Nous aurons l'occasion de discuter leurs avantages et leurs inconvénients.

A. — *Pendules mères.*

La plupart des pendules mères en service actuellement en France, sont basées sur le système d'échappement proposé et breveté par M. Ch. Féry en 1901.

La figure 8 montre le principe de cet échappement.

Le cliquet B est porté par la pièce *b* solidaire du pendule et entraîne, à chacune de ses oscillations vers la gauche, une dent du rochet C.

Pendant cet entraînement, le cliquet de retenue *g* est abaissé par la dent qui passe sous lui et il vient faire contact avec le ressort *f*. Un courant est ainsi envoyé dans la bobine E qui attire l'aimant D porté par le pendule, et le mouvement est ainsi entretenu.

Cet échappement doit être rangé parmi ceux que les horlogers appellent des « échappements libres », le pendule oscillant sans aucune liaison avec les rouages, sauf aux environs de son passage à la verticale où se produit en même temps l'entraînement du mouvement démultiplicateur des aiguilles et l'impulsion motrice.

Le principe est excellent et donne en pratique de très bonnes marches diurnes, de l'ordre d'une seconde par jour avec un pendule battant la demi-seconde. Cette exactitude est remarquable pour une

Digitized by Google

pièce, qui entraîne mécaniquement le rouage démultiplicateur et qui est entretenue par une pile dont la force électromotrice, variable avec la température et l'usure, est forcément moins constante que le poids moteur des pendules mécaniques.

M. Ch. Féry a indiqué la raison de cette précision inattendue.

Lorsqu'on dit que les oscillations d'un pendule sont isochrones, on énonce un principe qui n'est vrai, *même pour les applications courantes*, que pour des oscillations de très faible amplitude, ne

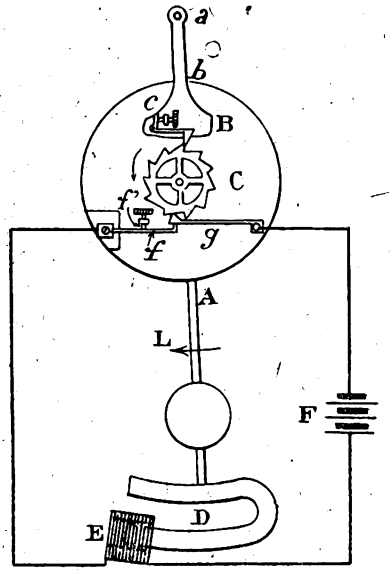


Fig. 8. — Pendule Féry.

dépassant pas un degré d'arc, réalisées dans les échappements soignés des pendules d'observatoire. Et, même dans ces cas, l'isochronisme pratique n'est obtenu que parce que les amplitudes entretenues par la force très constante d'un poids, varient extrêmement peu.

L'isochronisme théorique suppose que l'amplitude est assez faible, pour qu'on puisse identifier les sinus des écarts de la verticale avec les arcs. La différence se traduit par une erreur qui fait que le temps d'oscillation T d'un pendule dépend de l'amplitude 0 d'après la série :

$$T = \pi\sqrt{\frac{e}{g}}\left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\frac{0}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4\frac{0}{2} + \ldots\right]$$

qu'on peut réduire pour toutes les applications au premier terme :

$$T = T_0\left(1 + \frac{0^2}{16}\right).$$

Digitized by Google

T_0 étant la durée des oscillations infiniment petites. Le terme $\frac{\theta^2}{16}$ introduit ce qu'on appelle l'erreur circulaire du pendule.

En différentiant l'équation et en exprimant les variations en secondes par jour, on obtient finalement la formule :

$$v = 2700 \frac{x\delta x}{l^2}$$

où : x est la course linéaire totale mesurée à la distance l du point de suspension du pendule,
et v la variation en secondes par jour due à une variation δx de la course.

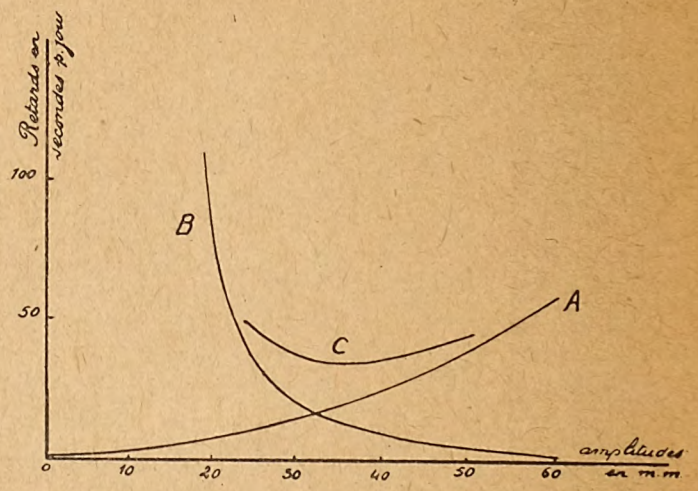


Fig. 9. — A. Courbe des erreurs circulaires.
B. Courbe des retards dus à l'échappement. — C. Courbe des erreurs totales

Pour fixer les idées sur l'ordre de grandeur de cette erreur, nous prendrons le cas réalisé à peu près dans une pendule Féry :
$l = 300$ mm $x = 40$ mm et nous supposerons $\delta x = 10$ mm ce qui est une variation possible en pratique lorsque la pile commence à s'user.

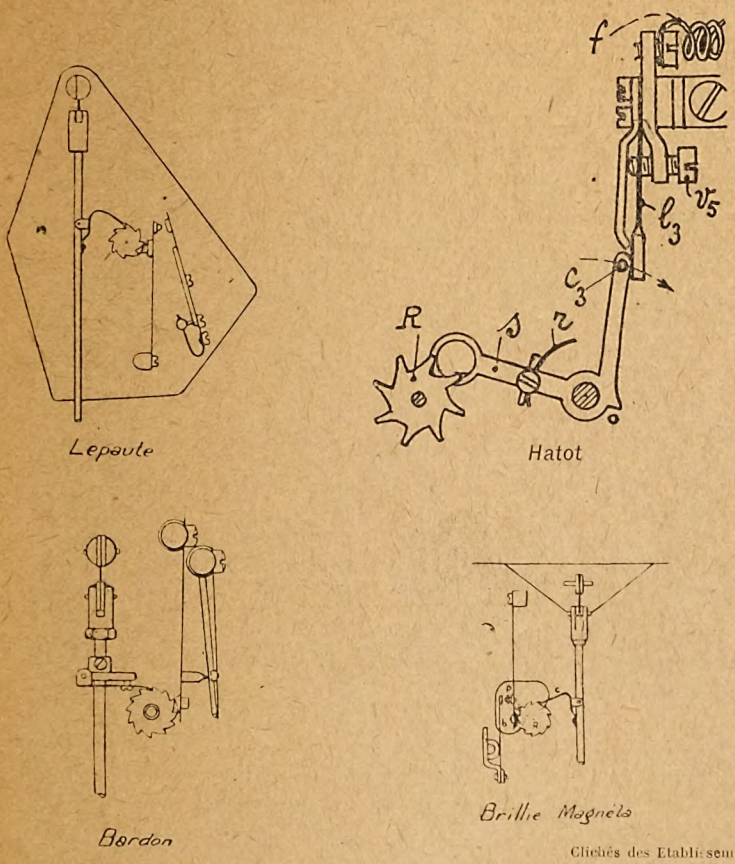
On trouve que $v = 12$ secondes par jour, ce qui est loin de l'exactitude de 1 à 2 secondes obtenue en pratique.

L'explication se trouve dans le fait qu'une autre *erreur*, dite erreur d'échappement se superpose à l'erreur circulaire. Le pendule reçoit une impulsion à son passage à la verticale, mais cette impulsion n'est pas instantanée. De plus, on règle généralement la longueur du cliquet d'entraînement du rochet de manière que l'entraînement se produise autant avant qu'après la position d'équilibre du pendule.

Digitized by Google

Dans ces conditions, l'impulsion se produit pendant une portion de la course un peu plus grande après qu'avant le passage à la verticale, ce qui donne lieu à une erreur d'isochronisme qui tend à faire retarder le pendule d'une quantité inversement proportionnelle au cube de l'amplitude.

Portons en abscisses (fig. 9) les amplitudes et soit en A la courbe



Clichés des Etablissements Hatot

Fig. 10. — Echappements de pendule mère.

des erreurs circulaires, c'est-à-dire le retard des oscillations réelles sur les infiniment petites pour un pendule absolument libre, et en B, la courbe des retards dus à l'échappement.

L'erreur totale sera la courbe C qui admet un minimum assez plat.

Autour de l'amplitude correspondant à ce minimum, que M. Féry appelle « amplitude de réglage », les oscillations sont pratiquement isochrones, et, en tous cas, plus que celles d'un pendule tout à fait libre. C'est ce qui explique le succès obtenu avec cet échappement.

Digitized by Google

Beaucoup de constructeurs français l'on adopté pour leurs pendules mères, sous des formes mécaniques diverses qui ne changent rien au principe.

Les figures 10 montrent les dispositions adoptées par les sociétés Brillié, Lepaute, Hatot, Bardon.

Dans toutes ces pendules, le dispositif qui communique les impul-

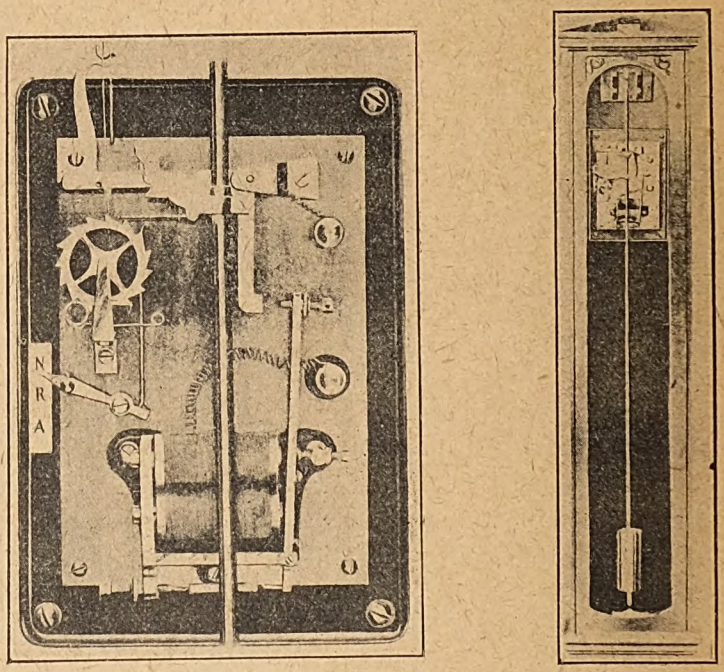


Fig. 11. — Echappement de la Synchronom Cº.

sions au pendule est du type Cornu dont nous avons déjà parlé (voir fig. 2).

La maison Bulle-Clock emploie comme pendules mères ses horloges indépendantes que nous décrirons plus loin.

Les pendules mères employées en Angleterre sont presque toujours à réaction électrique indirecte. Un électro-aimant remonte un levier dont la chute périodique produit l'impulsion motrice du pendule.

Nous reproduisons sur la figure 11 comme exemple typique de ces systèmes, le dispositif adopté par la « Synchronome Cº » de Londres.

Les horlogers suisses et allemands se sont beaucoup servis des systèmes de remontoirs électriques (Riefler, Normal Zeit, Favarger, Cohen, Wagner, David Perret, Aron, Bohmeyer, Schneider, etc). Je

Digitized by Google

renverrai pour la description de tous ces systèmes à l'ouvrage de M. A. FAVARGER.

Plus récemment, la maison Favarger et Cie a repris l'échappement

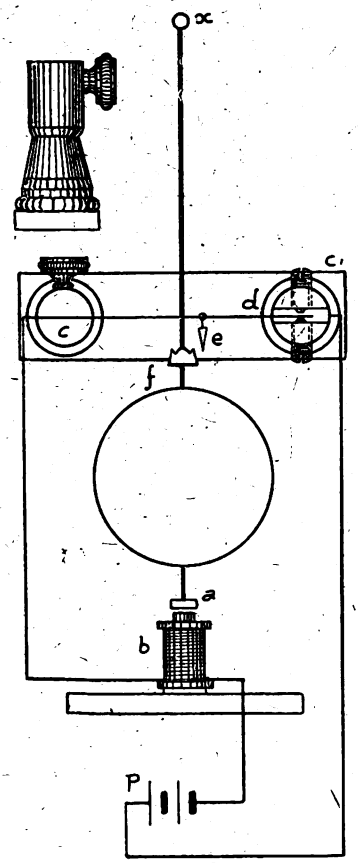


Fig. 12. — Echappement Hipp.

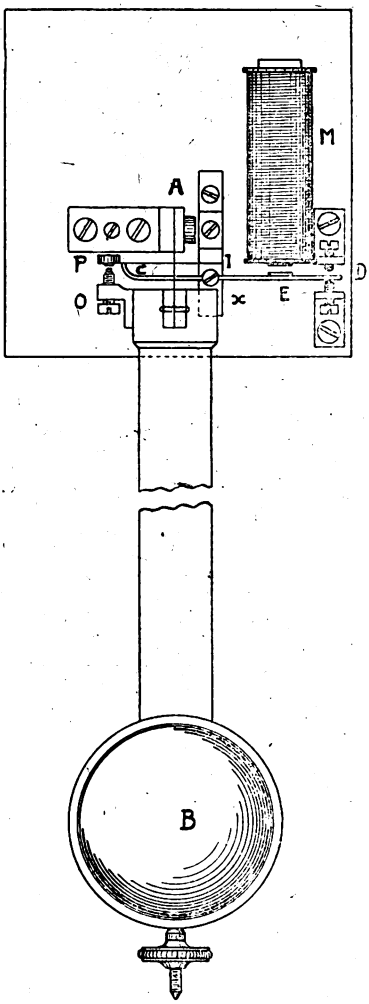


Fig. 13. — Echappement Froment.

à palette et contre-palette, combiné par HIPP en 1842 (fig. 12), ainsi que le système à force constante inventé en 1860 par FROMENT (fig. 13).

Ces pendules, bien que théoriquement très incorrectes, ont cependant pu donner de bons résultats, grâce aux soins minutieux et à

Digitized by Google

l'impeccable construction que les horlogers suisses savent apporter dans la réalisation de leurs pièces.

B. — *Systèmes de contacts à inversion de courant établis par les horloges mères.*

Pour les distributions d'heure munies de réceptrices à marche intermittente, avançant d'un pas toutes les 15 ou 30 secondes, nous

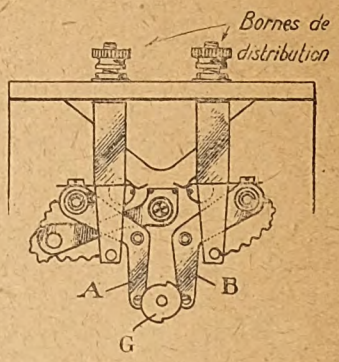


Fig. 14. — Contact de la Société Magnéta.

avons vu qu'il était presque indispensable, pour la sûreté du fonctionnement, d'employer des électro-aimants polarisés. Les émissions motrices doivent alors être alternées et la pendule mère doit manœuvrer,

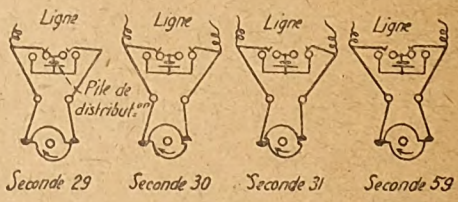


Fig. 15. — Fonctionnement de la came Magnéta.

à chaque période, un inverseur qui change la polarité de la pile à chaque émission.

Le dispositif de contact employé par la société Magnéta est indiqué sur la fig. 14. La came G est calée sur l'axe du rouage qui porte l'aiguille des secondes, et fait par conséquent un tour en 60 secondes. Elle soulève et laisse retomber alternativement les bras A et B. La fig. 15 montre la position des organes à quatre instants différents et explique suffisamment le jeu des contacts.

La fig. 16, montre le système employé par la Société Lepaute. Les

Digitized by Google

trois cames L, M et N sont aussi calées sur l'axe des secondes. Les leviers A et B sont remontés et retombent alternativement toutes les 30 secondes. Le levier K en basculant entraîne les lames C, D, E, F

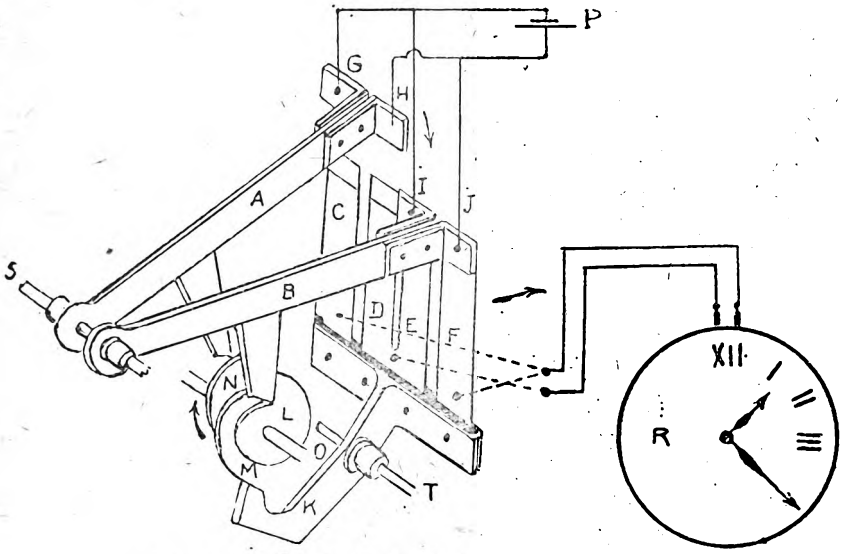


Fig. 16. — Contacts des Etablissements Lepaute.

et produit les ruptures de contact deux secondes après la chute de chacun des leviers A ou B.

C. — *Réceptrices à avances intermittentes.*

Ayant insisté plus haut sur la sûreté de marche, le meilleur rendement et la consommation réduite des distributions à courants inversés, je ne décrirai que les réceptrices polarisées, renvoyant pour les appareils à électro-aimants simples au traité de M. A. Favarger qui les décrit à peu près tous.

Même parmi les réceptrices polarisées, je me vois dans l'obligation, vu la multiplicité des systèmes proposés, de me limiter à quelques types caractéristiques.

On peut classer tous les systèmes employés en deux catégories. Dans la première, l'armature est oscillante et animée d'un mouvement de va-et-vient entre les pôles de l'aimant permanent.

Dans la deuxième catégorie, on placera les systèmes dans lesquels l'armature, alternativement attirée et repoussée par les pôles, exécute pas à pas des mouvements toujours dans le même sens.

Digitized by Google

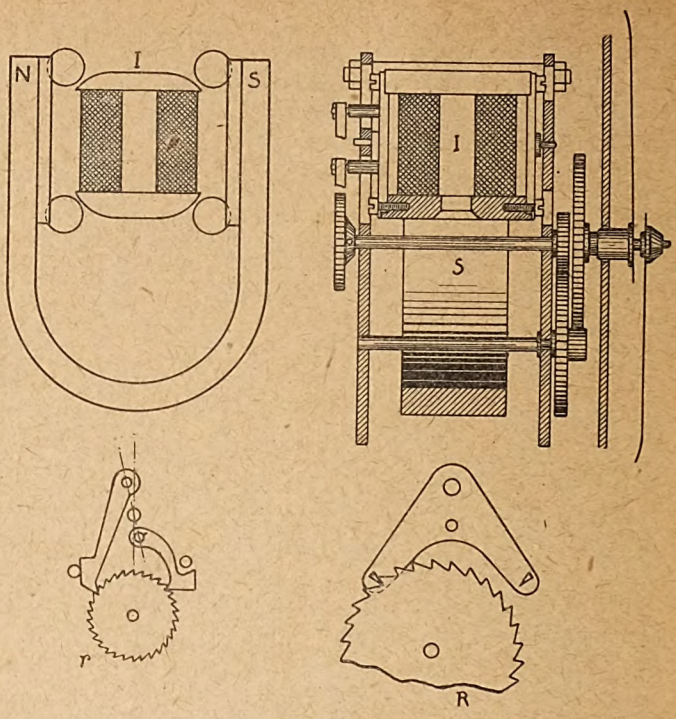


Fig. 17.

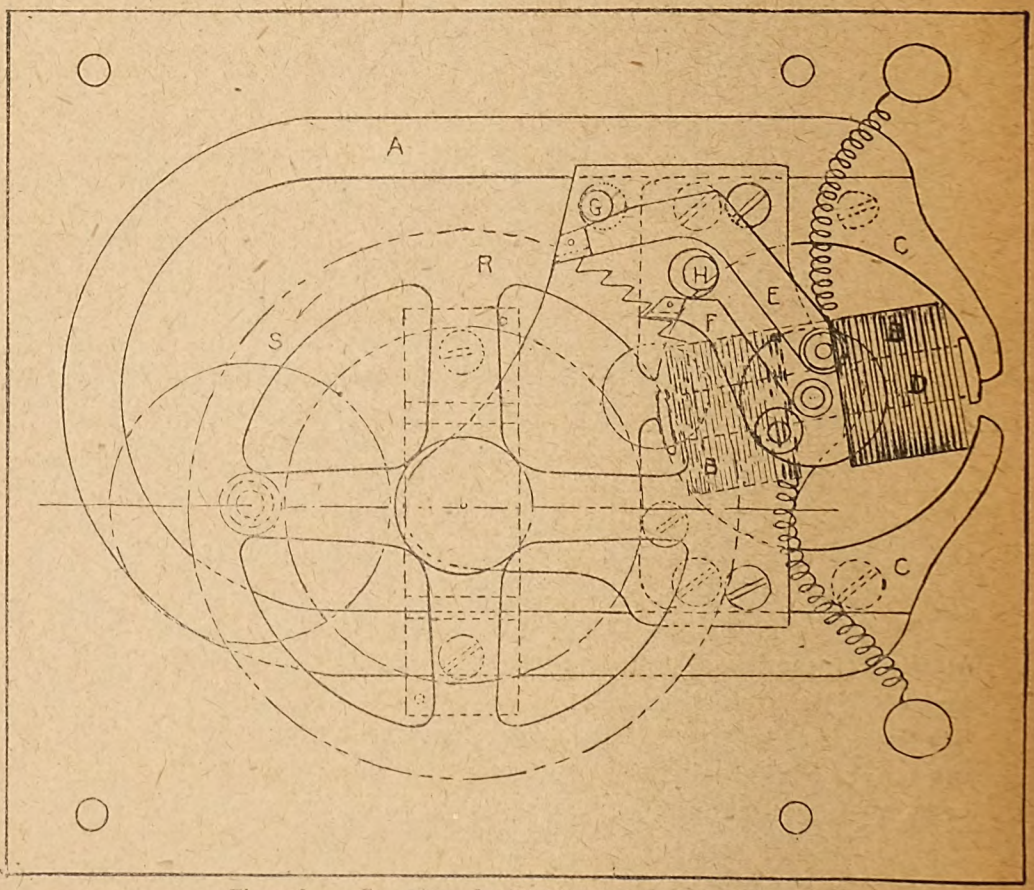


Fig. 18. — Compteur des Etablissements Lepaute.

Digitized by Google

La figure 17 montre un dispositif de la première catégorie, réalisé par M. Béache et employé par la Société Magnéta. La transformation du mouvement alternatif de l'armature en mouvement de rotation continue peut être réalisée, soit au moyen d'un système de cliquets et rochet, soit au moyen d'une ancre.

La fig. 18 montre le compteur adopté plus récemment par les Etablissements Lepaute, et qui est basé sur le même principe.

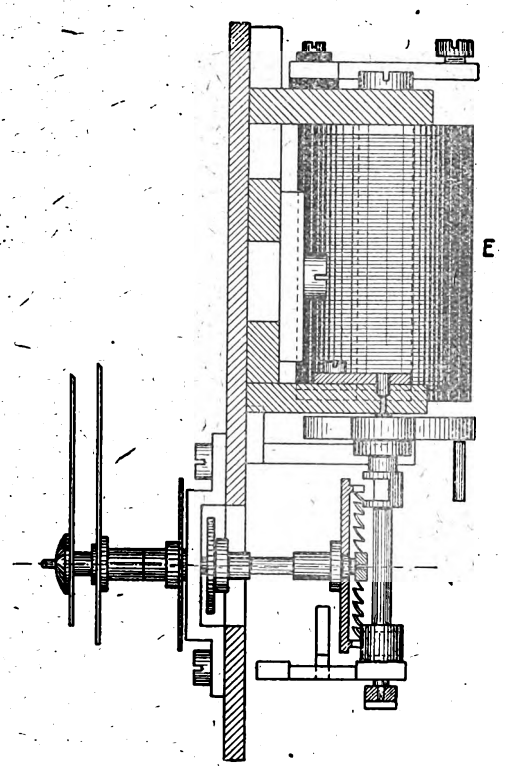


Fig. 19. — Compteur de Hipp.

Je citerai encore dans cette catégorie, le compteur de Hipp illustré sur la fig. 19, et dans lequel la transformation du mouvement est obtenue au moyen d'un dispositif analogue à un échappement à palette.

Toutes ces réceptrices ont un fonctionnement très sûr et consomment peu. Elles ont néanmoins un inconvénient qui est assez grave dans les locaux silencieux, salle de lecture, bureaux, chambres d'hôtel, etc... C'est que chaque déplacement de l'armature produit un toc, qui peut gêner considérablement les personnes qui ne peuvent en faire abstraction.

Digitized by Google

Les réceptrices de la deuxième caégorie ont été imaginées principalement pour obvier à ce défaut.

Je citerai le compteur Thomas (fig. 20), qui a été repris et perfectionné par la Société D. E. H. O. et le compteur Favarger (fig. 21).

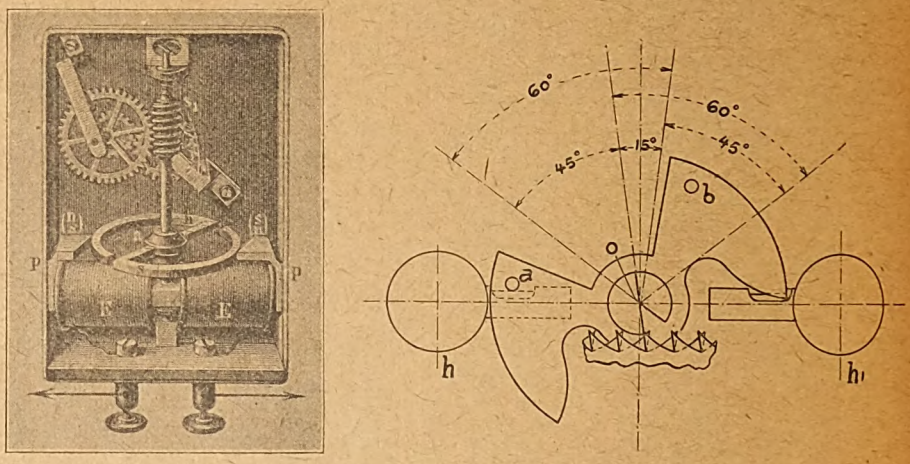


Fig. 20. – Compteur Thomas.

Le problème des réceptrices devient plus difficile à résoudre, lorsqu'il s'agit d'actionner de grands cadrans de gares ou de clocher.

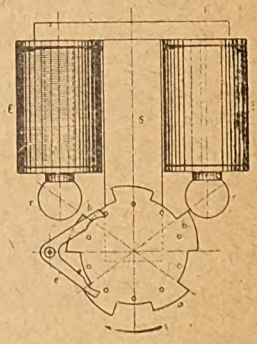


Fig. 21. — Compteur Favarger.

L'inertie des pièces en mouvement devient très importante et dans les très grandes pièces dont les aiguilles ne peuvent être protégées par un verre, l'action du vent et de la neige produit des efforts considérables. Le problème a été résolu de plusieurs manières dont les deux

Digitized by Google

plus élégantes sont indiquées schématiquement sur les figures 22 et 23.

Sur la fig. 22, deux roues d'angles A et B sont folles sur l'axe OO' ainsi que le levier L qui porte le pignon satellite C et le poids P et qui, au repos, s'appuie sur la butée fixe D.

La roue B est commandée directement par un mouvement récepteur ordinaire suffisamment puissant. La roue A porte l'aiguille des minutes du grand cadran à conduire.

Lorsque la roue B avance, par exemple d'une 1/2 minute sous l'in-

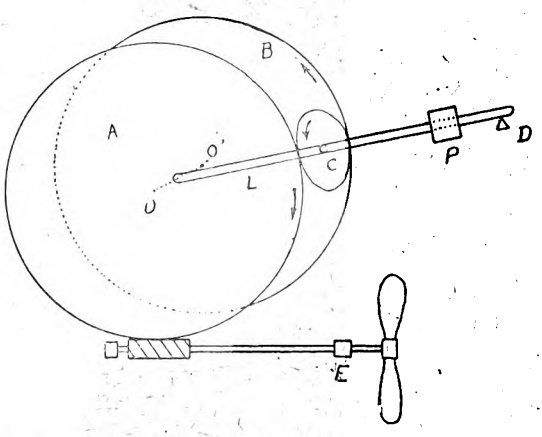


Fig. 22. — Appareil compensateur de l'action du vent.

fluence d'une impulsion lancée par l'horloge mère, elle entraîne la roue C, qui, à son tour fait avancer la roue A, pourvu que l'action du vent à ce moment ne soit pas excessive.

Dans le cas contraire, la roue A ne pouvant tourner, le levier L va se soulever avec le poids P qu'il porte.

Aussitôt que l'intensité du vent aura diminué, le poids P tendra à retomber en faisant tourner la roue A. L'action du vent peut même durer pendant plusieurs impulsions (ce qui d'ailleurs est assez rare), car le poids P agit comme enregistreur d'énergie et peut être soulevé de la quantité correspondante à plusieurs avances de la roue B.

Il va sans dire que l'appareil peut être muni d'un train d'engrenages irréversible entre les aiguilles et la roue A afin qu'une action antagoniste particulièrement violente du vent, ne puisse soulever le poids P d'une manière exagérée et le faire basculer complètement. On peut aussi engrener, avec la roue A, un régulateur à ailettes E destiné à amortir les mouvements des aiguilles et l'inertie qui en provient.

Digitized by Google

Le dispositif de la fig. 23 a été créé et mis au point par la Société Magnéta; nous en reproduisons ci-après la description.

Le moteur électrique 1 entraîne l'arbre principal 2 de la minuterie (aiguille des minutes), par l'intermédiaire d'un réducteur à vis tangente 3. L'extrémité arrière de cet arbre 2, porte une des roues

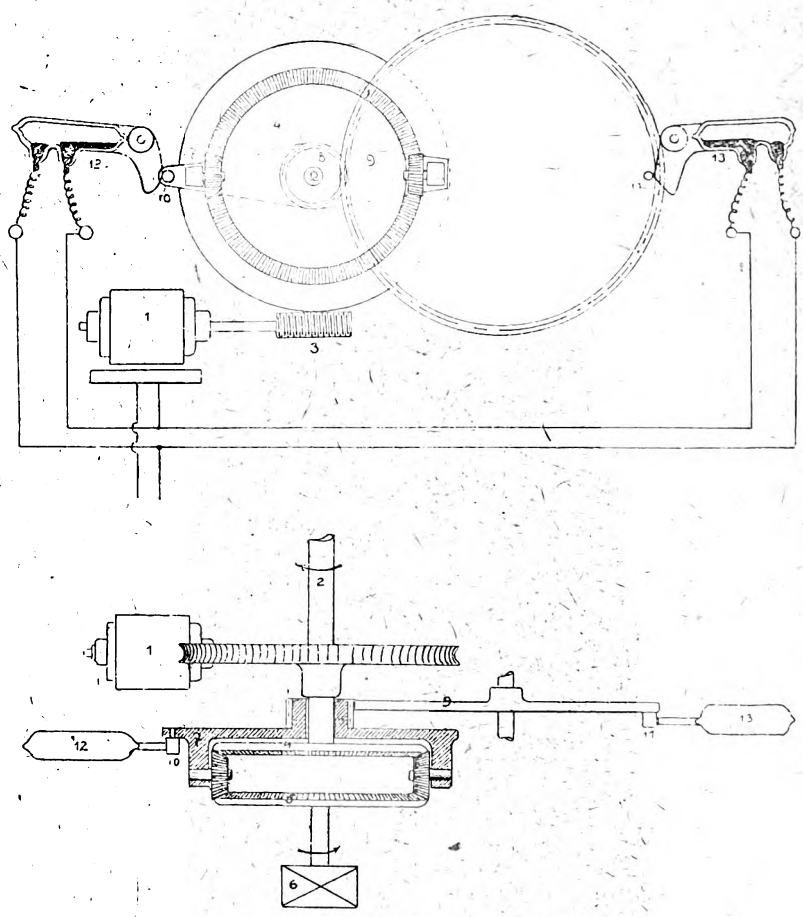


Fig. 23. — Réceptrice Société Magnéta.

d'angle 4 d'un différentiel, dont la seconde roue d'angle 5 est solidaire de l'arbre d'un mouvement récepteur 6. Le porte-satellites 7 de différentiel est fou sur l'arbre 2, et n'obéit qu'aux deux roues 4 et 5. Il entraîne par l'intermédiaire d'un pignon 8, une roue 9 qui tourne à une vitesse 6 fois plus petite. Cette roue 9 et le porte-satellites 7 portent chacun une broche 10 et 11, qui attaquent respectivement deux basculeurs à mercure 12 et 13, connectés en parallèle. Ces der-

Digitized by Google

niers peuvent fermer le circuit d'une source électrique sur le moteur 1.

« Le fonctionnement de l'appareil est le suivant :

« Dans la position représentée, le circuit du moteur est coupé. Quand le récepteur 6 avance dans le sens de la flèche, il fait tourner le porte-satellites 7 dans le même sens; la broche 10 libère le basculeur 12 qui ferme le circuit du moteur. Ce dernier se met en marche et entraîne dans le sens de la flèche 2; il entraîne en même temps la roue 4 du différentiel et par suite le porte-satellites 7 en sens inverse du sens précédent. La broche 10 attaque le basculeur 12; coupe le circuit du moteur qui s'arrête. On voit que si la source de courant ne fait pas défaut, le moteur tourne jusqu'à ce que l'accord soit rétabli entre l'aiguille des minutes et le mouvement récepteur.

« Le second basculeur 13 et le réducteur 9-8 ont pour but d'assurer également l'accord exact de l'aiguille des heures, le porte-satellites 7 reprenant la même position pour des écarts d'un multiple de 2 heures entre les aiguilles et le récepteur.

« En cas de manque de courant, si aucune source de secours n'est prévue, les aiguilles restent immobiles, mais le mouvement récepteur continue d'avancer, étant alimenté par une batterie de piles. Le différentiel tourne aussi et enregistre le retard, de telle façon que, dès la reprise du courant, les aiguilles avancent et se remettent d'elles-mêmes à l'heure exacte du récepteur.

« L'entraînement des aiguilles peut être assuré dans toutes les conditions, en proportionnant le moteur électrique à la puissance nécessaire.

« Le mouvement récepteur ne reçoit aucune réaction des grandes aiguilles, il n'a qu'un travail très faible à fournir et se trouve dans les meilleures conditions pour assurer un fonctionnement régulier.

D. — *Réceptrices à pendules synchrones.*

Les pendules indépendantes d'appartement qui font l'objet du chapitre suivant, peuvent être facilement synchronisées par des émissions de courant lancées *à chaque* battement par une pendule centrale de précision. On envoie directement les émissions dans les bobines motrices des pendules récepteurs sans passer par les contacts d'entretien autonome. On se reportera au mémoire de Cornu (1) pour

(1) La synchronisation électrique des pendules. Conférence faite par A. CORNU en 1894 devant la Société Internationale des Electriciens.

Digitized by Google

la théorie de synchronisation des pendules. En pratique, l'accrochage se fait de lui-même avec une grande latitude dans la période du pendule commandé.

Les impulsions motrices ne se produisent pas alors au moment du

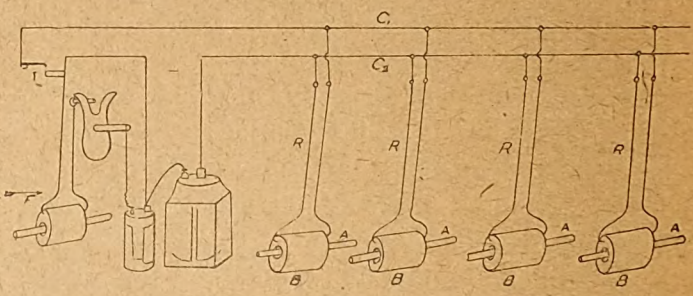


Fig. 24. — Système Moulin-Favre-Bulle

passage à la verticale, mais cela n'a aucune importance pour les distributions d'heure ordinaires où on ne cherche pas l'exactitude des fractions de secondes. Il en est tout autrement pour une distribution

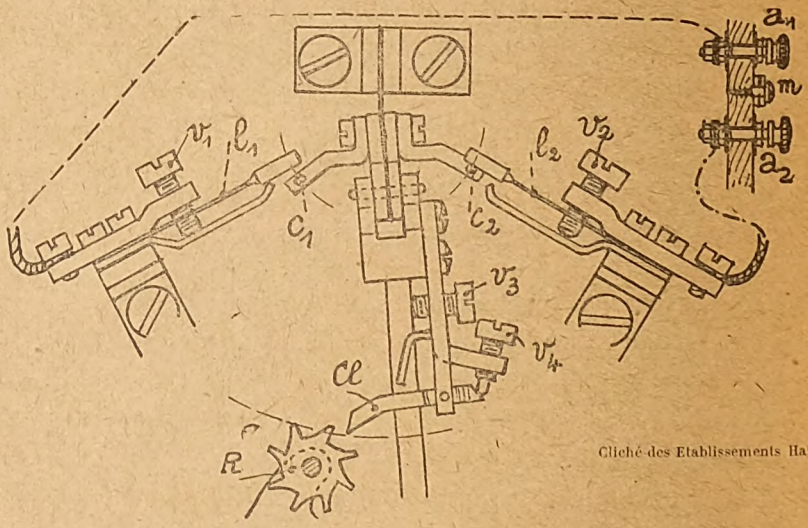


Fig. 25. — Système Hatot.

d'heure dans un observatoire, mais je n'insisterai pas sur ce problème qui est traité magistralement dans le mémoire cité ci-dessus.

Dans le système Moulin-Favre Bulle, la pendule mère est une des pendules indépendantes décrites plus loin, battant la demi-seconde. Cette pendule ferme un contact pendant les deux quarts de période qu'elle accomplit d'un côté de la verticale. Les émissions durent ainsi

Digitized by Google

une demi-seconde avec interruption pendant un temps égal. Les réceptrices sont identiques à la pendule mère, sauf que le contact est supprimé, les impulsions étant envoyées directement dans les bobines motrices. La fig. 24 donne le schéma complet d'une telle installation.

Le système employé par les Etablissements Hatot est analogue, sauf que les réceptrices battent le quart de seconde, alors que la pendule mère entretenue par un échappement du genre Féry (voir fig. 10) bat la demi-seconde.

L'horloge mère doit donc donner un contact d'une durée de l'ordre de 1/4 seconde à chacune de ses oscillations simples. La fig. 25 montre le dispositif adopté pour l'établissement de ce contact.

Pour les très grandes installations ou les transports de l'heure à de très grandes distances (cas de la distribution aux gares d'un réseau de chemins de fer par exemple), il peut être utile de faire usage de pendules relais ou de pendules mères secondaires. Nous verrons plus loin les dispositifs employés dans ce but.

E. — *Systèmes sans contacts et sans piles.*

Sous cette dénomination, on peut classer deux systèmes très particuliers dont nous ne parlerons que pour mémoire à cause des difficultés de réalisation.

Le premier, indiqué par Wheatstone, est basé sur le principe du télégraphe à cadrans par induction.

Une pendule mère produit périodiquement une rotation alternative d'une bobine à noyau de fer dans le champ intense d'un gros aimant. Il en résulte des impulsions alternatives dans cette bobine, qui, transmises par des lignes convenables, peuvent actionner des réceptrices polarisées.

Ce système a été plus récemment repris par la Compagnie allemande Magnéta. Un perfectionnement important a été réalisé en ce sens que la force nécessaire pour produire les impulsions n'est plus prise directement sur le mouvement de la pendule mère, mais sur un train séparé de rouages actionnés par un poids. La pendule mère n'a plus alors qu'à déclancher la rotation de l'induit aux instants voulus.

Malgré cette amélioration, le système n'est guère pratique à cause du remontage de la pendule mère et surtout du poids considérable, nécessaire pour mettre en mouvement la magnéto dans laquelle les impulsions sont induites. On a bien préconisé des remontages électriques automatiques de ces deux poids, mais le système n'est alors

Digitized by Google

plus « sans contact » et on arrive à un véritable gâchis d'énergie dans toutes les transformations successives : remontage d'un poids par un moteur électrique, actionnement périodique d'une magnéto par la chute de ce poids, transformation des impulsions électriques produites en énergie mécanique de rotation des aiguilles.

De plus, les impulsions données par le système sont extrêmement brèves, de l'ordre de 0,1 seconde, ce qui entraîne de grosses difficultés dans l'établissement des réceptrices. Et tout cela pour une question de contacts qui est maintenant résolue.

Un autre système « sans contacts » a été préconisé en Amérique.

Il consiste à actionner des réceptrices au moyen de petits moteurs synchrones, branchés sur les secteurs alternatifs de force motrice, et à régulariser la fréquence de ces secteurs au moyen d'une pendule mère de précision.

Le système de régulation est facile à comprendre. Une réceptrice est installée à la centrale et par un dispositif d'engrenages différentiels, tout décalage entre cette réceptrice et la pendule mère produit une action accélératrice ou retardatrice sur les régulateurs des turbines.

Quand on remarque que, dans le seul but de maintenir à l'heure exacte des réceptrices qui ne consomment pas 20 milliwatts, ce système nécessite une action constante sur des machines de milliers de kilowatts, leur impose une régularité tout à fait superflue, mais qui peut exiger à certains moments la mise en marche d'un turbo-alternateur supplémentaire, on reste confondu devant une solution aussi onéreuse de la distribution d'heure.

D'autre part, toute interruption de courant devient un incident grave et la société de force motrice se prohibe par cela même toute possibilité de couper la moindre partie de son réseau, si brève et si utile que puisse être cette interruption pour l'entretien et les essais des lignes. Enfin, un moteur synchrone si petit que celui qui actionne les réceptrices, tourne forcément très vite, d'où usure des pivots, nécessité d'une démultiplication énorme, bruit continu au moindre jeu, induit fragile, bobiné en fil très fin, mais devant résister à la tension entière du réseau, etc.

F. — *Pendules mères secondaires et pendules relais*

Dans les très grandes distributions d'heure, ou dans les transmissions à grande distance, la pendule mère centrale ne peut suffire à

Digitized by Google

commander directement toutes les réceptrices. On fait alors usage de pendules mères secondaires.

Ainsi, pour la distribution de l'heure dans une ville, on créera des centres horaires dans chaque quartier. Pour un réseau de chemins de fer, on disposera une pendule mère secondaire dans chaque gare, et chacune d'elles effectuera la distribution dans les services de cette gare.

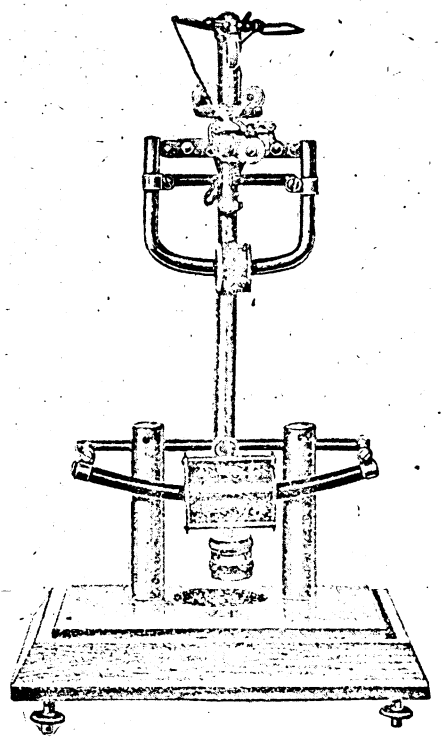


Fig. 26. — Système Favre-Bulle.

Il est bon et même presque indispensable qu'en cas de rupture ou de court-circuit sur un fil de transmission, les pendules secondaires intéressées par l'accident ne s'arrêtent pas, mais continuent à marcher par leurs propres moyens, mêmes si elles ne peuvent donner une précision aussi grande que la pendule centrale.

Le problème se trouve résolu par l'emploi de pendules mères secondaires identiques à la pendule centrale et possédant leur système d'entretien propre, mais synchronisées par des émissions envoyées à chaque oscillation par la pendule centrale.

Ainsi, l'accord parfait entre toutes les pendules secondaires se main-

Digitized by Google

tient tant que les lignes de synchronisation sont ininterrompues. Si une ligne vient à être coupée, la pendule secondaire ne sera plus maintenue rigoureusement en accord avec la pendule centrale, mais elle continuera à osciller avec sa marche propre et à distribuer l'heure aux réceptrices qu'elle commande.

Une précaution est nécessaire. En cas de boucle sur la ligne, la bobine motrice est mise en court-circuit et l'amortissement qui en résulte arrête bientôt la pendule malgré le dispositif d'entretien autonome qu'il possède.

M. Favre-Bulle a résolu cette difficulté d'une manière élégante, indiquée sur la fig. 26.

La pendule secondaire porte deux systèmes moteurs, l'un à grand rendement, sert à l'entretien autonome, l'autre constitué par une bobine à faible nombre de tours de fil et à rendement médiocre, est parcouru par le courant synchronisant.

Si cette deuxième bobine vient à être mise en court-circuit, l'amortissement est peu important, à cause du faible rendement, et n'empêche pas la pendule de marcher par son système d'entretien propre.

Un autre moyen employé par M. Favre est de synchroniser une pendule secondaire sans contact de marche autonome. Cette pendule synchronise à son tour une pendule autonome. En cas d'accident à la ligne, la première s'arrête, ce qui a pour avantage de signaler le défaut, et la deuxième continue à marcher et à commander les réceptrices.

Les ateliers Brillié Frères, ont récemment mis au point un système qui permet de synchroniser les pendules secondaires en se servant, comme lignes de transmission, des lignes téléphoniques des réseaux urbains.

Deux cas sont à considérer suivant que l'installation téléphonique est à batterie locale ou centrale.

Dans le premier, le courant synchronisant est fourni directement par l'horloge centrale au moyen de deux bobines plates placées de chaque côté de la bobine motrice du pendule. Ce courant alternatif à une période par seconde est presque sinusoïdal et passe tout à fait inaperçu à l'oreille de l'abonné à cause de sa basse fréquence et de sa faible intensité. Une ligne à batterie locale étant toujours bouclée sur le récepteur et le transformateur du poste d'abonné, la bobine synchronisante de la pendule secondaire peut être mise en série avec la ligne pourvu qu'elle n'affaiblisse pas les courants téléphoniques. A cet effet, on pourra la shunter par un condensateur de 2μF qui per-

Digitized by Google

mettra le passage direct des courants de fréquence musicale de la parole.

La fig. 27 donne le schéma de ce dispositif.

Dans le cas d'un réseau à batterie centrale, la ligne d'abonné est

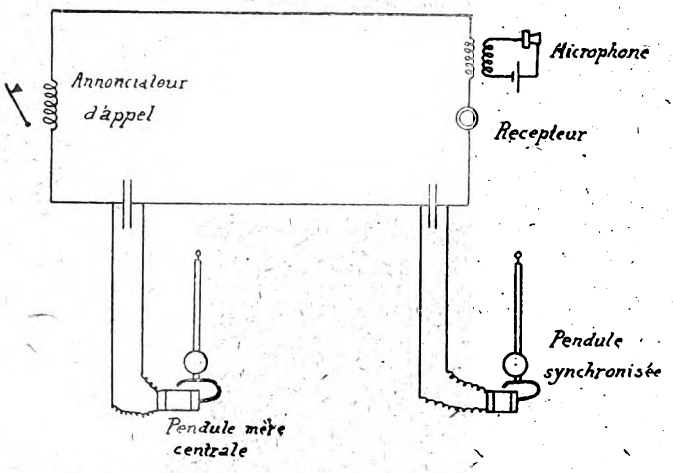


Fig. 27. — Système Brillié frères pour batterie locale.

coupée par le crochet commutateur, sauf lorsque l'abonné est en conversation. La solution proposée est alors de mettre la pendule à synchroniser en série avec la sonnerie (fig. 28) et de produire

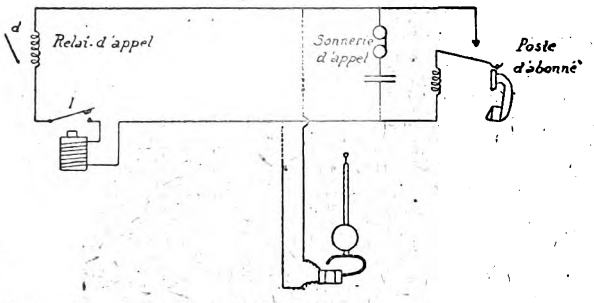


Fig. 28. — Système Brillé frères pour batterie centrale.

des impulsions motrices sur la ligne à raison de une par seconde au moyen d'un interrupteur I, commandé par la pendule mère centrale.

Pour éviter que ces impulsions soient gênantes pour l'abonné, on bloque l'interrupteur I pendant les conversations au moyen d'un relais R par exemple actionné par le courant d'alimentation du microphone. Les impulsions synchronisantes manquent pendant ce temps,

Digitized by Google

mais, à moins que l'abonné ne cause presque sans arrêt, le synchronisme se rétablit aussitôt la conversation terminée.

Enfin, au lieu de pendules secondaires synchronisées, on peut aussi faire usage de pendules indépendantes remises à l'heure automatiquement à intervalles fixes, 24 heures par exemple. Nous décrirons plus loin ces systèmes de remise à l'heure.

G. — *Remise à l'heure d'un ensemble de réceptrices pas à pas.*

La possibilité de remettre à l'heure, à partir du poste central, les différentes parties d'une distribution d'heures est un facteur essentiel de succès d'un système.

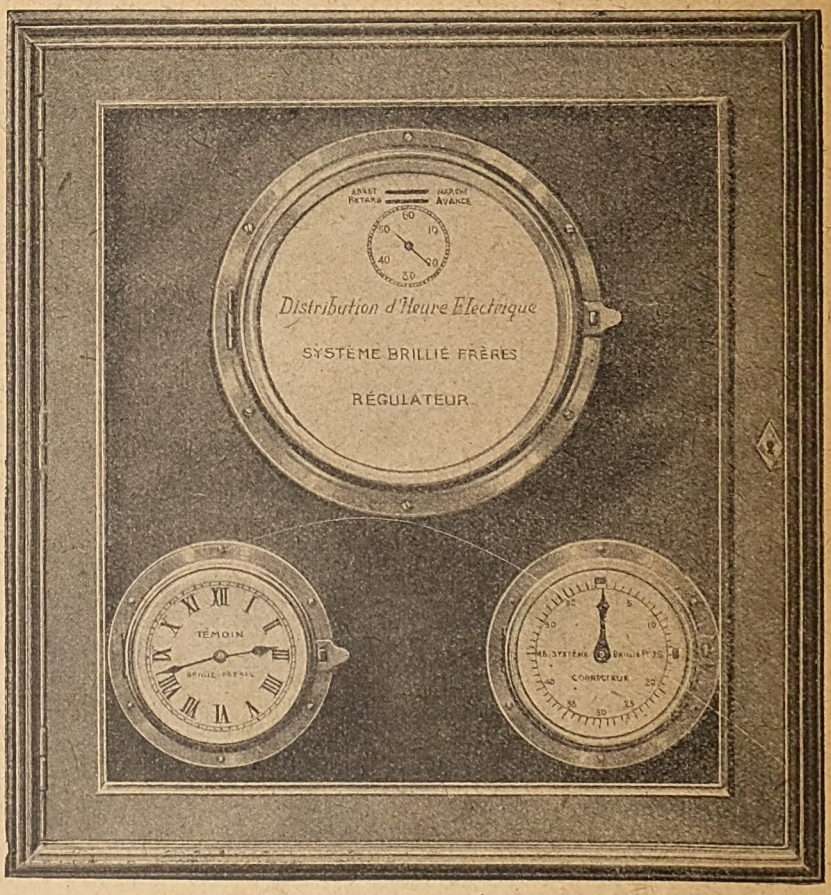


Fig. 29. — Système Magnéta.

Pour les réseaux à réceptrices pas à pas, la solution est facile. Il suffit de supprimer un certain nombre d'émissions pour corriger une

Digitized by Google

avance *d'un multiple pair* et entier de demi-minutes et de soulever le cliquet d'impulsion du pendule, si l'installation avance d'un nombre de secondes inférieur à 60.

Pour corriger les retards, il suffira de produire des impulsions supplémentaires pour regagner un nombre entier de minutes et d'avancer la trotteuse de la pendule mère pour regagner les secondes, en ayant soin de ne pas franchir à la main les secondes auxquelles se font les émissions de commande des réceptrices.

C'est un système de ce genre qui est employé dans les installations marines de la Société Magnéta. La correction de l'heure sur les transatlantiques rapides se fait deux fois par jour et peut atteindre une demi-heure chaque fois.

L'installation est pourvue d'un système correcteur qui envoie ou supprime automatiquement des impulsions de la manière suivante (fig. 29).

I. — Pour avancer les horloges réceptrices de N minutes, il suffit de mettre le petit index du correcteur sur A (avance) et l'aiguille centrale du correcteur à la division du cadran correspondant à N minutes. Il s'établit à l'intérieur du correcteur une série de mouvements inversés qui font avancer immédiatement les réceptrices de la quantité voulue N.

II. — Pour retarder les horloges réceptrices de N minutes, on meut l'index du correcteur sur R (retard) et l'aiguille centrale du correcteur à la division correspondant à N minutes. Toutes les horloges réceptrices restent arrêtées pendant le nombre de minutes voulu, et repartent après les N minutes.

H. — *Remise à l'heure d'une installation de pendules synchronisées.*

Pour les installations munies de réceptrices à pendules synchronisées ou d'horloges mères secondaires synchronisées, on ne peut exécuter brusquement la remise à l'heure comme ci-dessus, car les réceptrices n'obéiraient pas ou décrocheraient.

On agit alors momentanément sur la marche de l'horloge centrale en la faisant avancer ou retarder d'une petite quantité qui ne change pas la période suffisamment pour que la résonance des mouvements synchrones soit détruite.

La variation de marche doit bien entendu, être opérée sans qu'on soit obligé d'arrêter l'horloge centrale.

Ceci peut se faire de l'une des manières illustrées sur la figure 30.

Digitized by Google

A côté du pendule principal dont la tige est figurée en T, se trouve un petit pendule P lié à T par la bielle B et suspendu à une longue lame de ressort S.

Une raquette L, pivotant autour de O, porte deux goupilles qui encadrent la lame S. En agissant sur L de manière à lever les goupilles le long de S, on produit un retard du pendule et vice-versa.

Un autre système est donné sur la deuxième fig. 30. En dessous de l'aimant moteur du pendule, se trouve une bobine B dont le plan des spires est horizontal et qui est parcourue par un faible courant. Cette bobine attire (ou repousse) le pôle S de l'aimant, et agit comme une

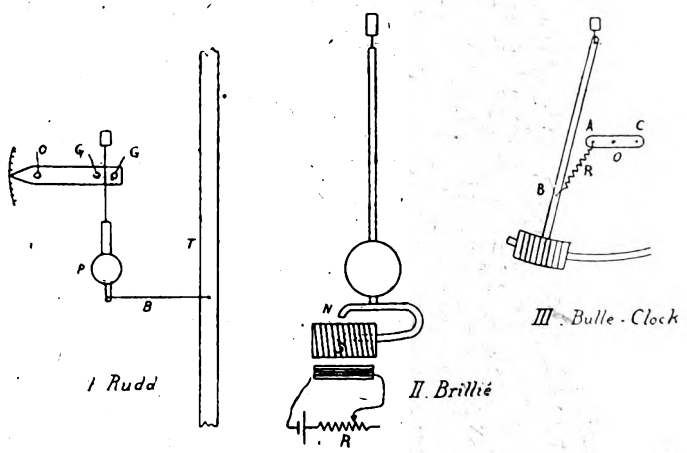


Fig. 30. — Systèmes de remise à l'heure.

augmentation (ou une diminution) de la force de la pesanteur. En faisant varier le courant dans B au moyen d'un rhéostat R, on modifie la période du pendule.

Enfin, la Bulle Clock possède une correction d'isochronisation dont je parlerai plus loin. C'est un ressort R (3e fig. 30), fixé au bâti en A et au pendule en B. On peut facilement s'en servir pour modifier la marche, en fixant A à l'extrémité d'une raquette mobile autour de O. En abaissant l'extrémité C, on fait avancer le pendule. On le retarde au contraire en la relevant.

I. — *Remises à l'heure automatiques par T. S. F.*

Si on dispose d'un signal électrique transmis à heure fixe par une horloge mère, à midi juste par exemple, on conçoit qu'on puisse s'en servir pour rappeler sur douze heures les trois aiguilles d'une pen-

Digitized by Google

dule électrique indépendante. En effet, tous les systèmes à balanciers moteurs produisent l'avance des aiguilles, au moyen d'un rochet et d'un cliquet d'avance fixé sur le pendule.

Il suffira de munir l'axe de ce rochet d'une came en cœur, sur laquelle viendra appuyer l'armature d'un électro-aimant excité par le signal (fig. 31), l'extrémité de l'armature relevant en même temps le cliquet d'avance pour le dégager des dents du rochet.

Si le rochet a 15 dents, on pourra ainsi, pour un pendule battant la demi-seconde, corriger un écart de ± 7 secondes par jour, écart qui ne sera jamais atteint en 24 heures par une bonne horloge mère avec échappement Féry.

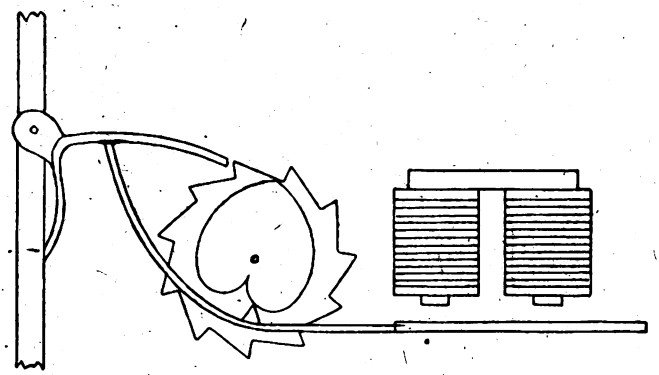


Fig. 31. — Système de remise à l'heure par T. S. F.

Quant au signal, il pourra être transmis par l'horloge mère d'une manière quelconque, soit par fil spécial, soit par T. S. F.

Dans ce dernier cas, néanmoins, certaines difficultés se présentent.

D'abord, le signal reçu sera très faible et devra être amplifié fortement avant de pouvoir être employé pour produire l'effet mécanique nécessaire. Ceci n'est pas grave depuis l'apparition des lampes à trois électrodes et avec l'emploi des relais polarisés sensibles, du type Baudot. Pour éviter l'usure, les lampes, bien entendu ne devront s'allumer qu'un peu avant l'arrivée du signal et s'éteindre aussitôt la remise à l'heure effectuée.

Ceci est facile à obtenir en produisant l'allumage et l'extinction par un contact commandé par une roue mobile en 24 heures, entraînée par le mouvement de la pendule elle-même.

Enfin, il faut éviter les signaux étrangers, soit qu'ils proviennent du poste émetteur lui-même, soit qu'ils soient produits par les parasites. Ces derniers sont assez peu à craindre, car ils sont très brefs

Digitized by Google

et n'ont pas le temps de faire fonctionner intempestivement les relais de remise à l'heure.

Pour éviter les autres, on peut, soit allumer les lampes très peu de temps avant le signal, pendant une période d'attente où, par convention, le poste n'émet pas, et les couper aussitôt la remise de l'heure effectuée (Brevet Lebréjal-Lepaute), soit effectuer la remise à l'heure au moyen d'un signal de forme convenue, de très longue durée par exemple, et introduire dans l'installation un relai retardé qui ne

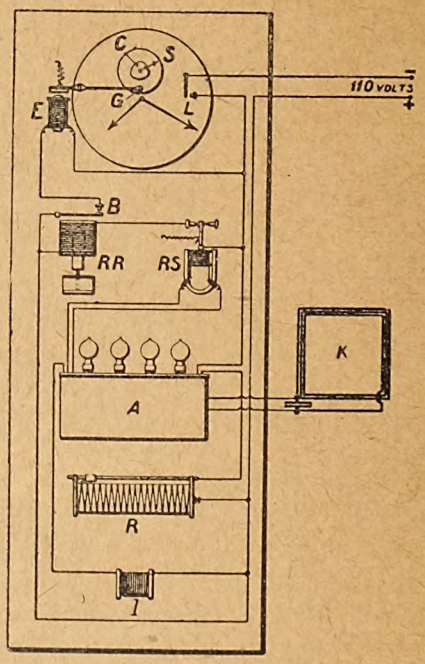


Fig. 32. — Système du Général Ferrié.

puisse fonctionner qu'avec un signal de cette durée (Système du Général Ferrié, construit par Brillié Fr.).

Je décrirai d'abord le dispositif du Général Ferrié, qui a le premier posé et résolu le problème de la remise à *l'heure par T. S. F.* et dont un appareil fonctionne depuis plus de quatre ans à la gare Saint-Lazare de Paris.

Le récepteur de T. S. F. comporte le cadre K (fig. 32) accordé une fois pour toutes, ainsi que les divers circuits du poste A à 4 lampes, sur la longueur d'ondes des émissions horaires de la Tour Eiffel.

Les signaux reçus subissent une double détection, les transformant d'abord en signaux de fréquence musicale, puis en courants redressés.

Digitized by Google

L'allumage des lampes triodes est produit schématiquement par l'interrupteur L. (En réalité c'est un contact à mercure commandé par une réceptrice séparée de l'horloge mère qui opère l'allumage et l'extinction quotidiens). A la sortie du poste, les signaux de la Tour Eiffel actionnent un relais sensible RS, qui à son tour envoie le courant du secteur dans le relais retardé R. R. que nous verrons plus en détail tout à l'heure. Toute émission qui n'a pas une durée de 5 secondes est sans action sur le contact de ce relais. Seul le long trait intercalé de 9 h. 26 m. 25 s. à 9 h. 26 m. 30 s. dans les signaux ho-

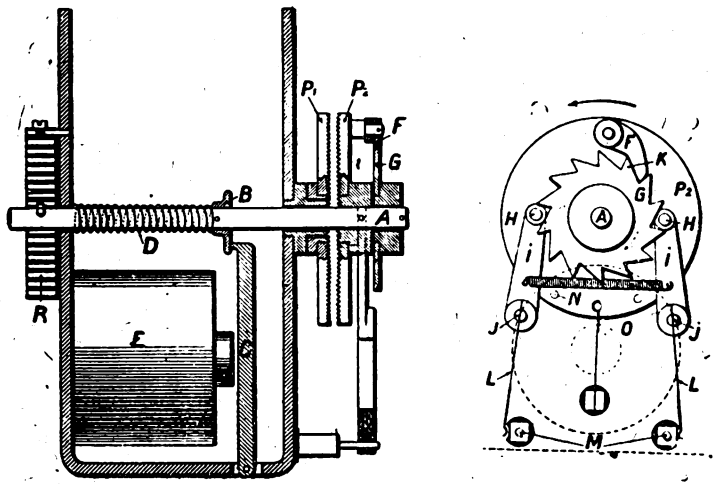


Fig. 33. — Relais retardé.

raires, produit la fermeture de B et par suite l'attraction de E et la remise à zéro de l'aiguille des secondes de l'horloge.

Le relais retardé est une ingénieuse solution d'un problème difficile.

Il comporte un plateau P_1 (fig. 33) entraîné par une réceptrice de la distribution d'heure à raison de 1 tour par minute. Ce plateau tourne fou sur l'axe A, mais lorsqu'une émission de la Tour Eiffel est reçue par le poste et le relais R. S, la bobine E attire son armature, l'axe A et le plateau P_2 sont amenés vers la gauche et embrayés avec P_1. Le plateau P_1 se met donc à tourner, le ressort spiral S se bande et le cliquet F se déplace dans le sens de la flèche devant le rochet fixe G. Si l'émission dure moins de 5 secondes, ce cliquet n'accomplit pas une course suffisante pour tomber derrière la dent K du rochet G et le plateau P_2 étant débrayé et ramené à sa position primitive par le ressort spiral R, aucune émission de courant n'est produite.

Digitized by Google

Au contraire, lorsque le trait de 5 secondes arrive, le plateau P_2 se trouve embrayé pendant le temps nécessaire pour effectuer 1/12e de tour. Le cliquet F tombe derrière la dent K, et lorsque l'émission cesse, le ressort R en ramenant l'axe A, le plateau P_2 et le cliquet F à leurs positions de repos, fait tourner le rochet d'une dent. Les galets H portés par les leviers I se trouvent soulevés pendant le passage

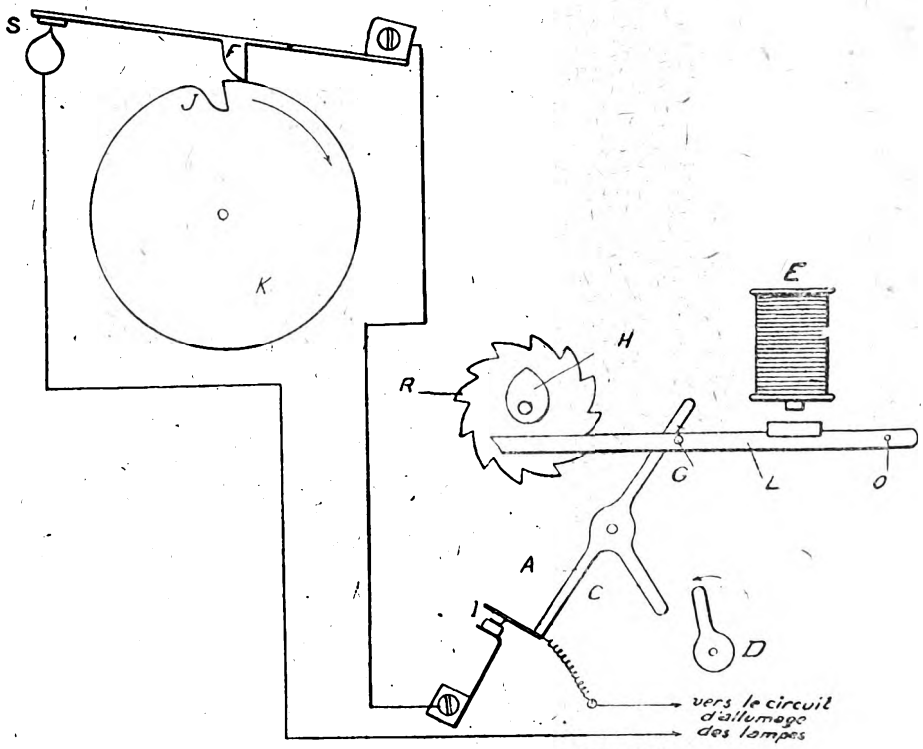


Fig. 34. — Remise à l'heure Lebrejal.

de cette dent et le contact s'établit entre les lames L et les piliers platinés M. C'est ce contact qui actionne le relais E de la figure 32.

Ce système, comme d'ailleurs toutes les solutions premières de problèmes nouveaux, est assez compliqué.

Une solution plus simple a été récemment mise au point par M. LEBREJAL.

Le principe de ce système est d'utiliser pour la remise à l'heure le premier signal horaire de 0,4 seconde de durée précédé d'un silence d'une minute, qui est émis à 10 h 31 mn par la Tour Eiffel. On évite ainsi la nécessité du signal de 5 secondes, qui apporte une surcharge assez lourde au poste émetteur de la Tour.

Digitized by Google

Comme le point de 10 h 31 est suivi une seconde plus tard d'un nouveau point, il importe que le système de remise à l'heure soit mis hors service en moins d'une seconde après avoir agi. On obtient ce résultat en faisant couper le courant de chauffage des lampes par le fonctionnement même du dispositif de remise à l'heure.

Les détails du système sont indiqués sur les figures 34.

L'électro de remise à l'heure E est excité par un relai Baudot, actionné par le poste de réception de T. S. F.

La came K est entraînée par la pendule mère à raison de un tour en 24 heures. Environ 30 secondes avant l'heure du signal, c'est-à-dire à 10 h 30 mn 30 s. l'ergot F tombe dans l'encoche J de cette came et le contact S ferme le circuit d'allumage des lampes.

A 10 h. 30 mn 60 s. le signal de remise à l'heure arrive.

L'électro E (qui en réalité est un électro polarisé de réceptrice), attire le levier L pivoté en O. Ce levier agit sur la came de remise à zéro H du rochet R, et en même temps, une goupille G portée par ce levier, repousse le bras B et produit la rupture du contact I, de sorte que les lampes s'éteignent.

La came J continuant son mouvement, le contact S se trouve de nouveau interrompu à environ 10 h. 35.

On peut donc refermer I de manière à remettre l'ensemble en position pour l'allumage du lendemain.

La fermeture de I est produite par le doigt D qui est entraîné par le mouvement du pendule à raison de un tour en 8 minutes, et qui vient pousser le bras C.

Le poste de T. S. F. comporte une détectrice à réaction, suivie d'une basse fréquence qui donne un courant suffisant pour actionner le relais Baudot, mais une précaution est nécessaire.

Lorsque l'allumage des lampes se produit, un courant d'établissement prend naissance dans le poste et pourrait actionner la remise à l'heure. La suppression de cette perturbation a été obtenue d'une manière très simple et élégante par l'installation d'une lampe triode, fonctionnant en kénotron, à la sortie du poste.

Le courant d'établissement dont nous avons parlé est un courant uni-directionnel qui ne peut traverser le kénotron à cause de son sens, alors que le courant de fréquence acoustique qui provient de l'émission de la Tour se trouve redressé et en mesure d'actionner le relais Baudot.

Ces deux systèmes de remise à l'heure ne peuvent être appliqués, ainsi que nous l'avons vu plus haut, qu'à des installations qui ne

Digitized by Google

comportent pas de réceptrices ou pendules secondaires synchrones.

Dans ce cas, il faudrait faire agir le relais de remise à l'heure, non pas sur le rochet de l'horloge mère, mais sur un des dispositifs de variation de marche indiqués sur la figure 30.

Il est facile d'imaginer un tel système dans lequel un limaçon calé sur l'axe des secondes de la pendule mère, limiterait la course d'un levier attiré par le relais de remise à l'heure. La course serait ainsi proportionnelle au retard ou à l'avance de la pendule et produirait une variation correspondante de la marche.

J. — *Comparaison des différents systèmes de distribution d'heure.*

Je ne parlerai pas des systèmes sans contact dont le procès a été fait plus haut, et je me bornerai à indiquer les avantages et les inconvénients des systèmes à réceptrices pas à pas et à réceptrices synchrones.

Les systèmes à réceptrices synchrones ont le grand avantage de ne craindre en aucune façon les ratés, les contacts doublés et les inductions accidentelles sur les lignes.

On peut couper les lignes pendant plus de 10 secondes consécutives, sans que les réceptrices perdent une seule seconde. La consommation de courant est extraordinairement petite. Toutes les réceptrices sont montées en dérivation, et chacune d'elles absorbe seulement l'équivalent d'un courant constant de l'ordre de 0,5 milliampère. De plus, leur résistance électrique étant très élevée, de l'ordre de 3 000 ohms, la marche ne dépend pas de la résistance des lignes, qui sont ainsi plus économiques.

Enfin, les pendules relais pour les très grandes installations, sont des réceptrices ordinaires simplement munies d'un contact supplémentaire de distribution.

Les seuls inconvénients de ce système résident dans la complexité un peu plus grande des remises à l'heure et dans le danger pour des réceptrices posées sur une cheminée, par exemple, et non scellées en place, de perdre quelques secondes lorsqu'on les bouscule.

Enfin, les installations marines ne peuvent évidemment être munies que de réceptrices pas à pas, qui seules ne sont pas affectées par les mouvements du navire.

V. — Pendules indépendantes d'appartement.

Le problème des petites pendules d'appartement est un des plus difficiles à résoudre d'une manière satisfaisante. On doit en effet, con-

Digitized by Google

cilier dans ces appareils, des conditions d'encombrement et de prix de revient qui vont directement à l'encontre les unes des autres.

L'usage impose, pour les pendules à cheminée, des dimensions réduites qui obligent à employer des balanciers courts et des piles d'encombrement réduit.

On doit donc diminuer le plus possible la consommation de courant. Or, la faible longueur du balancier et le poids réduit des bobines, compatible avec un prix de revient modique, rendent difficile l'obtention d'un bon rendement du système moteur.

Les questions de prix et d'encombrement empêchent l'emploi de piles de force électromotrice constante. L'amplitude des oscillations variera donc du simple au double suivant que la pile sera neuve ou aura été quelques années en service. D'autre part, pour éviter les arrêts, on est amené à donner aux balanciers courts de grands arcs de battement.

On se trouve en résumé, devant un pendule circulaire court animé d'oscillations de grandes amplitudes très variables.

L'erreur circulaire d'isochronisme, atteint alors pratiquement des valeurs inacceptables de l'ordre de plusieurs minutes par jour.

Si on ajoute à toutes ces difficultés, la nécessité d'une grande robustesse et d'une simplicité de mouvement compatible avec le bas prix de revient, on se rend compte de la complexité du problème.

Heureusement, la robustesse et la simplicité sont deux avantages non seulement compatibles avec la réalisation des mouvements électriques, mais inhérents au principe du balancier moteur.

La difficulté d'obtenir un bon rendement avec de petites bobines a été résolue par l'emploi de forts aimants en acier au cobalt ou de formes bien étudiées.

Enfin, les défauts d'isochronisme ont été vaincus par l'adjonction de systèmes correcteurs, dont le principe est analogue à celui de la compensation des erreurs dont nous avons déjà vu l'importance dans le système d'entretien de M. Ch. Féry.

On est arrivé par ces divers artifices à réaliser des pendules d'un prix réduit, d'une grande robustesse, d'une précision excellente et qui possèdent cet avantage si précieux en pratique de ne nécessiter aucun remontage pendant plusieurs années.

A. — *Descriptions des systèmes actuellement exploités.*

Je vais passer en revue, les différents systèmes actuellement dans le commerce dans l'ordre chronologique de leur apparition.

Digitized by Google

La fig. 35 montre schématiquement le dispositif de contact et le pendule moteur de la Bulle Clock, et la fig. 36 le système d'entraînement des rouages qui est produit au moyen du cliquet moteur R et du cliquet de retenue W. On peut remarquer que la résistance d'entraînement du rouage a pour effet d'appuyer le contact. La fig. 37,

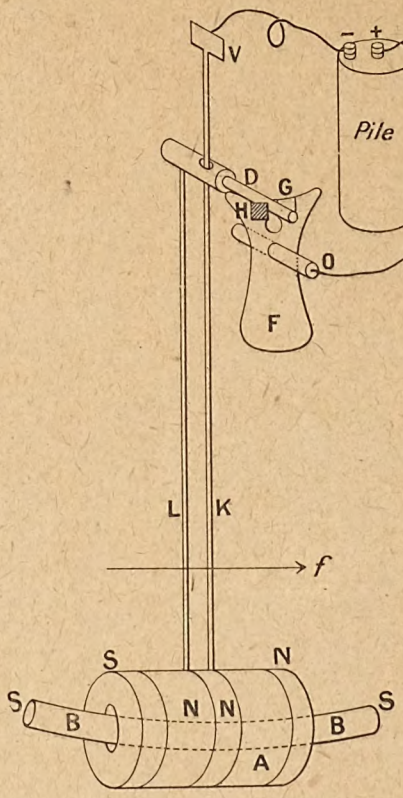


Fig. 35.

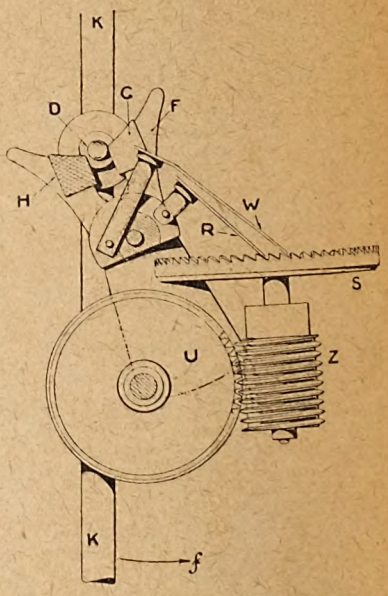


Fig. 36.

Clichés de *La Nature*.

Pendules d'appartement système Bull Clock.

indique les rôles du petit ressort R qui s'appuie sur l'axe de la fourchette F et qui sert en même temps de balai de prise de courant sur l'axe de cette pièce, de frein pour assurer son immobilité aux fins de course et enfin de rappel de jeu longitudinal.

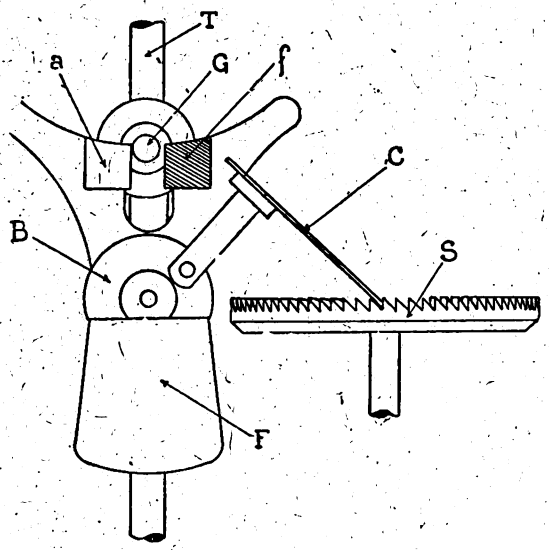
L'œillet par lequel ce ressort s'appuie, roule sans glisser sur l'axe T de manière qu'aucune usure n'est à craindre.

La correction de l'erreur d'isochronisme est obtenue au moyen du dispositif indiqué sur la figure 30, III.

L'action du ressort R sur le pendule est une force proportionnelle au cube du déplacement du pendule. Elle est proportionelle à la ten-

Digitized by Google

sion initiale, de sorte qu'en réglant cette tension à la valeur convenable, on arrive à compenser la différence entre le sinus et l'arc



Cliché de *La France Horlogère.*

Fig. 37. — Système Bull Clock.

des angles du pendule avec la verticale et à annuler l'erreur circulaire.

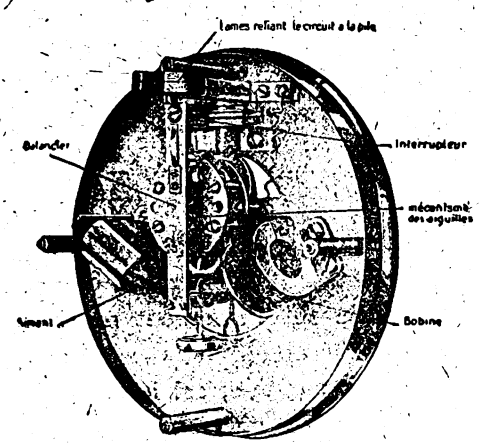


Fig. 38. — Pendulette Hatot.

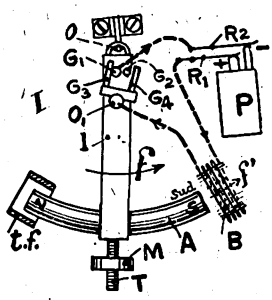


Fig. 39.
Clichés des Etabl. Hatot.

La démultiplication de mouvement qui conduit les aiguilles, est obtenue par une vis tangente irréversible.

La fig. 38 est une vue générale du mouvement d'une pendulette Hatot battant le quart de seconde. Le système de contact est schématisé

Digitized by Google

sur la figure 39. La pendule est munie de plus d'un système de calage (fig. 40), qui permet d'immobiliser le pendule pendant le transport de l'appareil. La correction de l'erreur circulaire est obtenue au moyen d'un amortisseur, constitué par un tube de cuivre rouge qu'on aperçoit sur la gauche de la fig. 38.

La fig. 41, montre l'aspect du mouvement d'une pendulette Bardon. L'échappement est du type Féry (voir fig. 10).

La figure 42 est une vue générale de la pendulette 1/4 sec. Electro-

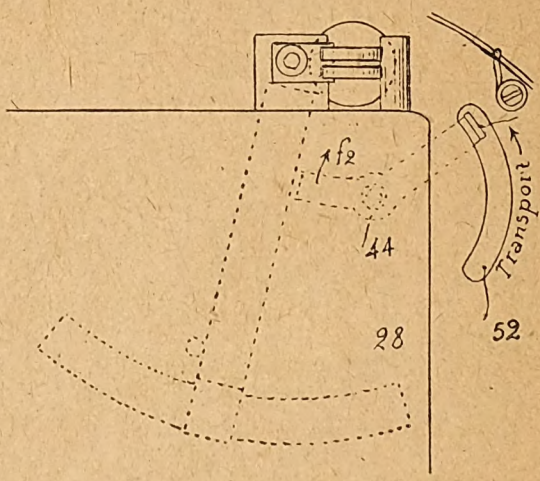


Fig. 40. — Calage d'immobilisation.

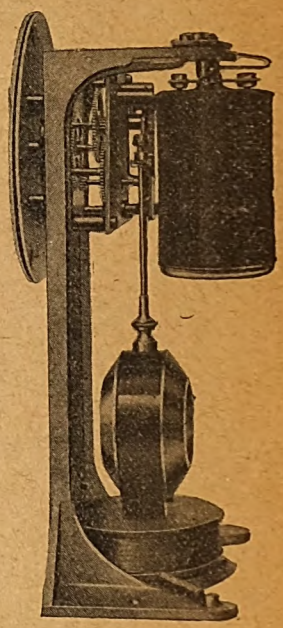


Fig. 41. — Pendulette Bardon.

sonor. L'échappement (fig. 43) est analogue à celui de M. Ch. Féry, mais a reçu divers perfectionnements destinés à en rendre le réglage plus facile pour les mécanismes de faible encombrement nécessaires dans un mouvement battant le quart de seconde.

Une particularité intéressante de cette pendule, est le système de réglage au moyen duquel on peut faire avancer ou retarder la marche en tournant simplement un bouton moleté, sans déplacer l'appareil, sans arrêter ni troubler le mouvement du pendule. Ce dispositif est visible en A sur la fig. 42.

La correction d'isochronisme a été particulièrement soignée. Elle est basée sur le principe qu'un pendule qui touche un ressort aux extrémités de son oscillation tend à avancer aux grands arcs. En

Digitized by Google

combinant cet effet avec un amortissement magnétique en fin de course, on est arrivé à un isochronisme presque parfait.

Enfin, on aperçoit en B (fig. 42), le système de calage pendant les transports. Lorsqu'on pousse le pendule à fin de course vers la droite,

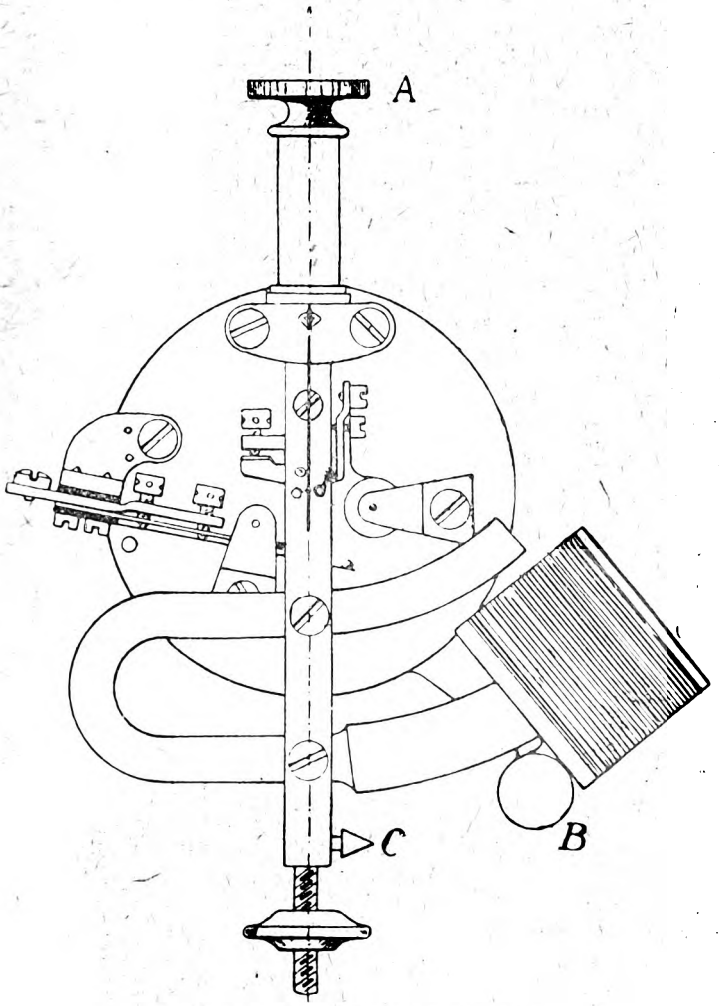


Fig. 42. — Pendulette Electrosonor.

le bouton C s'accroche dans le tube B. Pour libérer le pendule au moment de la remise en marche de l'appareil, il suffit de pousser sur le bouton B.

Un système tout à fait différent de ceux que nous avons vus jusqu'ici, est celui de la pendule électrique Zénith, basée sur l'allongement thermique d'un fil chauffé par le passage d'un courant.

Digitized by Google

La source de courant est fournie par un petit transformateur branché sur un secteur alternatif d'éclairage. Le secondaire fournit sous une tension de 3 V, 5 le courant nécessaire.

Le fonctionnement est indiqué sur la fig. 44. Le pendule en oscillant vers la gauche, ferme le contact 22 et envoie le courant dans le fil 7 qui s'échauffe et s'allonge.

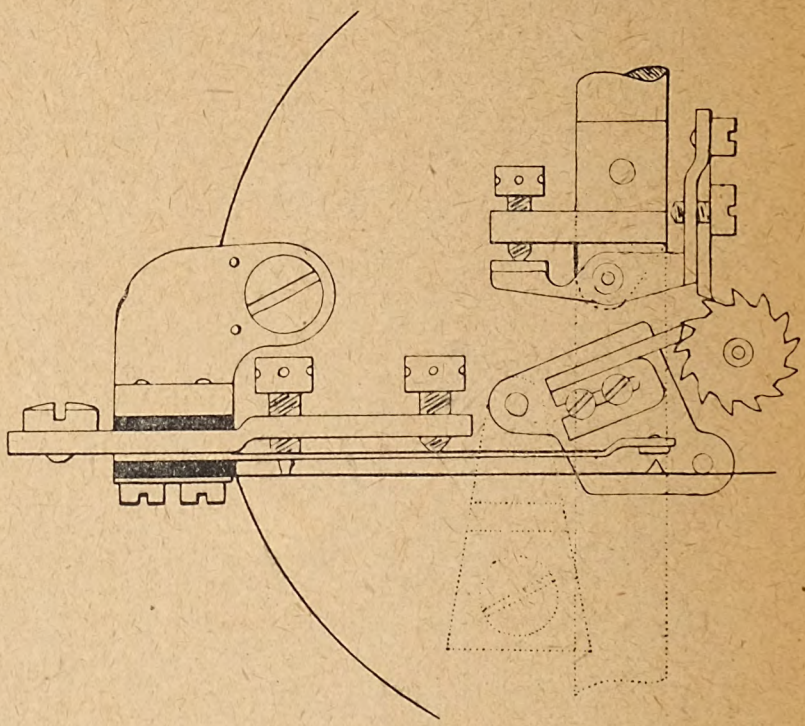


Fig. 43. — Echappement Electrosonor.

L'extrémité supérieure de ce fil est attachée en 15 à une pièce qui bascule autour de l'axe 13, et qui porte un ressort 10 relié au pendule par un fil de soie 8. Le fil 7 étant allongé, le ressort 10 se détend. Lorsque le contact 22 se rompt pendant l'oscillation du pendule vers la droite, le fil 7 se refroidit et le ressort 10 se tend et tire sur le pendule. Les tractions variables du ressort 10 sur le pendule ne suivent pas instantanément les établissements et les ruptures du courant à cause de l'inertie calorifique du fil, il en résulte un certain décalage qui suffit pour l'entretien du pendule. Pour éviter les étincelles au contact 22, un second circuit de même résistance que celui du fil est

Digitized by Google

branché sur un second contact 23, et shunte le circuit du fil actif au moment de la rupture.

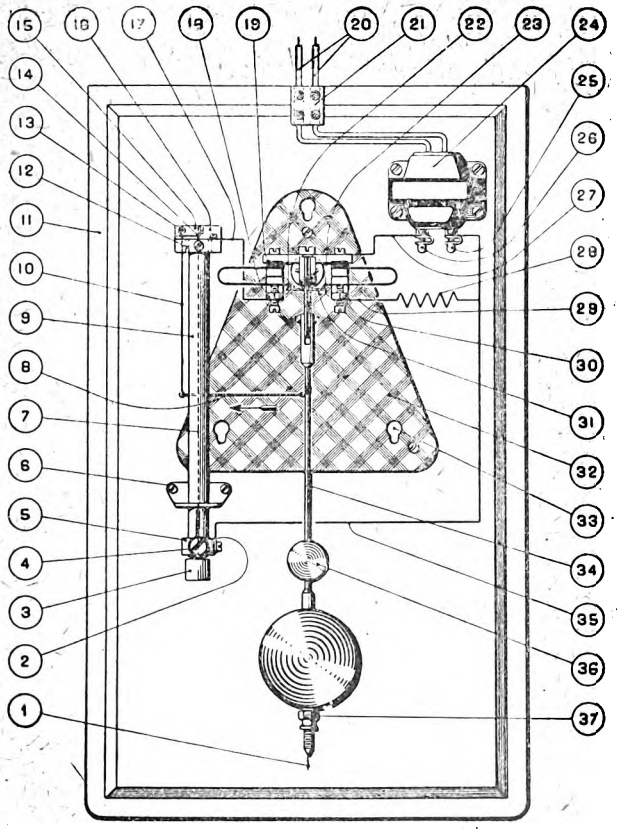


Fig. 44. Cliché des Fabriques des montres Zénith

B. — *Effets de sonnerie.*

Les pendules mécaniques possèdent le plus souvent un effet de sonnerie des heures et des demies. La sonnerie des pendules d'appartement est entrée dans les mœurs depuis plusieurs siècles et est devenue une nécessité, à tel point que les statistiques du commerce de l'horlogerie montrent que 95 pour cent des mouvements vendus en France, sonnent les heures et les demies.

Jusqu'à ces temps derniers, aucun système pratique de sonnerie pour les pendules électriques d'appartement n'avait été mis au point et cela constituait une lacune importante dans le commerce de l'horlogerie électrique.

Cette lacune avait été clairement aperçue il y a plus d'un demi-

Digitized by Google

siècle par M. Ch. Mildé, un des horlogers les plus réputés de l'époque et dont le nom faisait autorité en horlogerie électrique.

Nous reproduisons sur les figures 45 et 46 une pendule d'une ingéniosité remarquable due à ce savant et qui est munie d'un effet de sonnerie d'heures, demies et quarts, avec répétition des heures à volonté pendant la nuit.

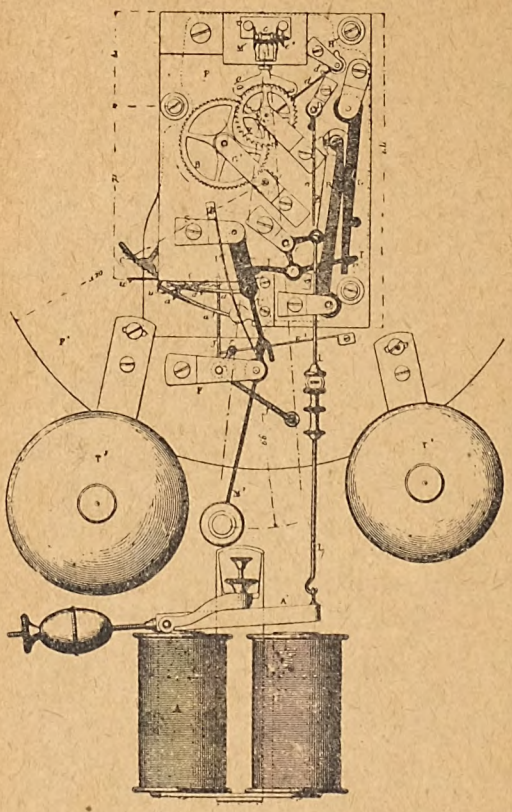


Fig. 45. — Pendule Mildé à sonnerie.

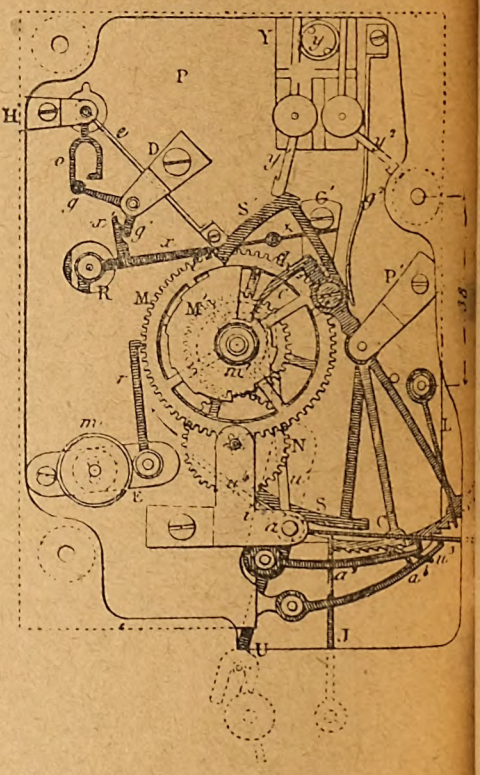


Fig. 46. — Pendule Mildé à sonnerie.

On en trouvera la description détaillée dans le traité de Du Moncel déjà cité, auquel nous empruntons les figures.

Un exemplaire de ce système qui a été exploité commercialement, se trouve au Musée du Conservatoire National des Arts et Métiers.

La fig. 47, montre le détail d'un effet de sonnerie proposé déjà depuis plusieurs années par les établissements Bardon.

Malheureusement, ce système est assez compliqué et a l'inconvénient de prendre brusquement sur la force vive du pendule régulateur, toute l'énergie nécessaire pour frapper les coups de timbre.

Digitized by Google

Lors de la sonnerie des douze coups de midi, le freinage est tellement important que l'amplitude du pendule diminue à moins de la moitié de sa valeur normale, ce qui produit des variations de marche sensibles et risque d'amener des arrêts.

On a aussi proposé de nombreux systèmes dans lesquels un barillet (ou un poids) est remonté constamment par le mouvement d'horlogerie mû par le pendule moteur. Ces systèmes ont aussi l'inconvé-

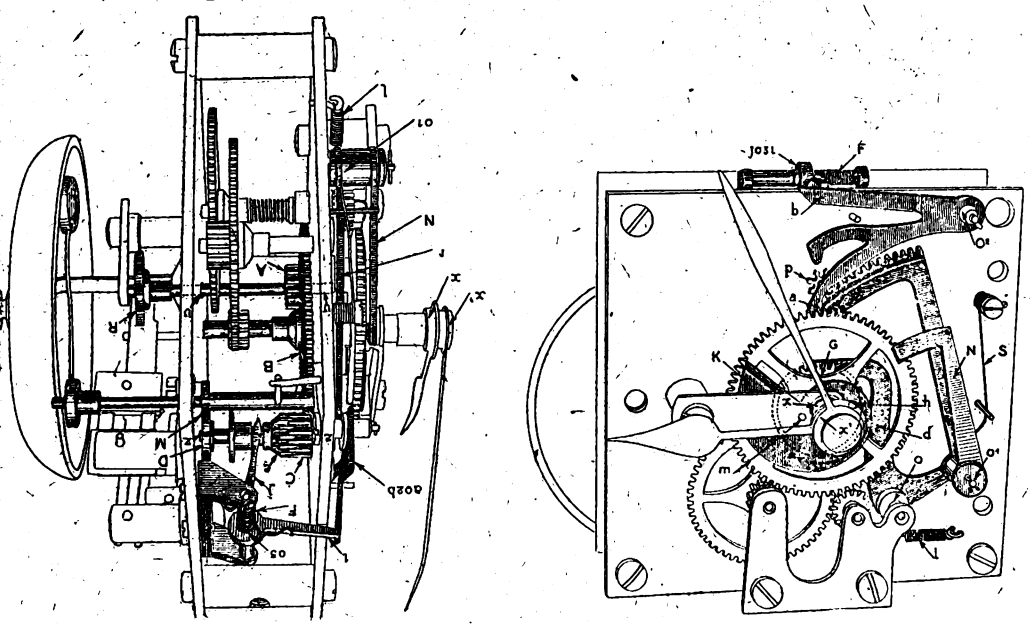


Fig. 47. — Clichés prêtés par les Etablissements Bardon.

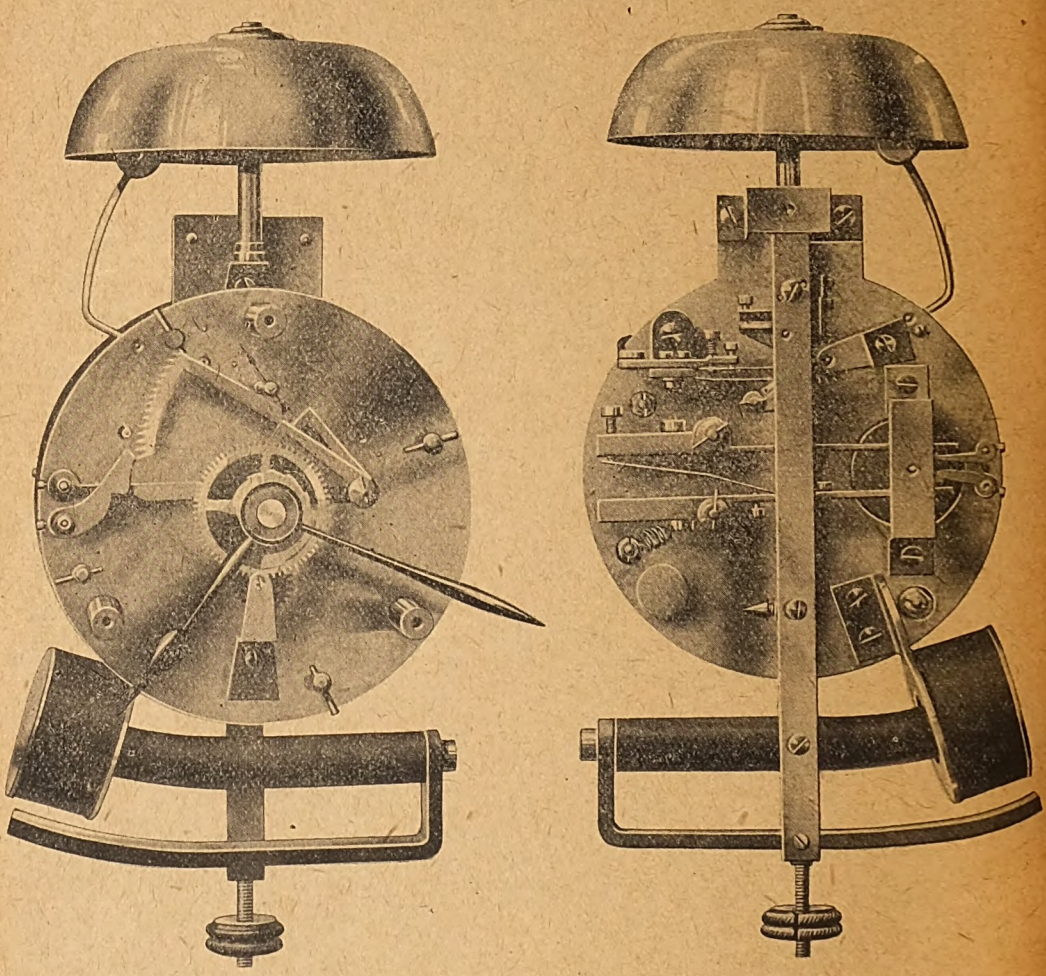
nient d'influencer la marche et ils réintroduisent dans les mouvements tous les inconvénients dus aux barillets, et aux pressions sur les rouages. Pour espacer les coups de timbre, on fait usage de volants à air dans les systèmes de sonnerie mécanique. Ces volants doivent être évités car ils donnent lieu à de grosses dépenses d'énergie. On a proposé de confier au pendule le rôle d'espacer les coups de timbre en lui faisant aux instants voulus, fermer un interrupteur, à chacune de ses oscillations. Mais alors, si l'interrupteur est robuste et donne de bons contacts, il trouble la marche de l'horloge.

Enfin, quel que soit le mode de production de la sonnerie, l'énergie nécessaire pour l'actionner est toujours prise sur la pile de l'horloge et pour éviter de surcharger cet élément, il faut que le rendement du système soit très bon.

Digitized by Google

La fig. 48 montre les vues avant et arrière d'un effet de sonnerie adapté aux pendules ELECTROSONOR, et qui semble réunir toutes les conditions requises pour un fonctionnement durable.

L'énergie est fournie par un petit moteur électrique avec induit à



Clichés Mildé fils et Cie.

Fig. 48.

trois branches alimenté par le même élément de pile qui sert à l'entretien du pendule. Ce moteur est mis en marche seulement au moment où la sonnerie se déclanche et s'arrête aussitôt que le nombre voulu de coups de timbre a été produit.

La consommation annuelle est inférieure à 0,5 ampère-heure, ce qui est insignifiant pour la pile.

L'encombrement est suffisamment réduit pour que tout le système,

Digitized by Google

y compris les rouages du mouvement ordinaire de l'horloge trouve sa place dans le calibre courant d'un mouvement de 80 mm de diamètre.

La remise à l'heure des aiguilles n'influe en aucune manière sur le réglage de la sonnerie. On peut tourner les aiguilles indifféremment dans un sens ou dans l'autre, sans s'arrêter sur les heures et les demies. Aussitôt que la sonnerie sera de nouveau déclanchée, elle indiquera l'heure exacte marquée par les aiguilles.

Ce système est d'ailleurs applicable à tous les effets de sonnerie qu'on peut demander à une pendule (sonnerie des quarts, sonneries à répétition, carillons etc...).

VI. — Applications diverses.

Je terminerai par la description succincte d'un chronographe électrique, construit par les ateliers Brillié Frères, qui permet d'enregis-

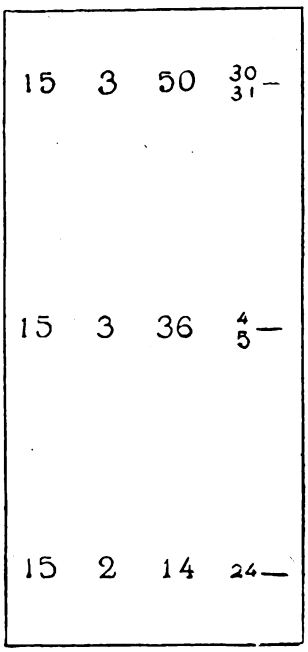


Fig. 49. — Bande.

trer par impression l'instant où se produit un signal, avec une précision d'un centième de seconde. L'appareil comporte, en principe, un chronomètre de précision qui synchronise, au moyen de contacts émis tous les cinquièmes de seconde, un moteur électrique à rotation continue.

Digitized by Google

Ce moteur entraîne un tambour imprimeur, portant cent chiffres à sa périphérie et qui exécute un tour par seconde. L'impression se fait au vol sur une bande de papier par un système analogue à celui de l'appareil Hughes.

La fig. 49 reproduit un fragment de bande portant les impressions déclanchées par trois signaux.

Il va sans dire que le déclanchement de l'impression peut se faire automatiquement, par le passage d'une automobile sur un basculeur, par la rupture d'un fil à une arrivée de course, etc.

J'espère avoir fait entrevoir par ce rapport, toutes les ressources qu'on peut tirer de l'introduction de l'électricité dans la science si vaste de l'horloger.

Ces applications sont sorties de la période héroïque des essais et ont acquis leur place dans le domaine industriel courant. L'horlogerie électrique possède maintenant ses méthodes propres, ses principes de construction et ses formes mécaniques, aussi différents de ceux de l'horlogerie ancienne que peuvent l'être les turbo-alternateurs modernes comparés aux machines à vapeur du siècle dernier.

Et de même que les avantages des moteurs électriques ont amené la disparition des machines à vapeur dans les ateliers modernes, de même, dans le domaine de l'horlogerie, l'électricité aura d'ici quelques années conquis une place privilégiée.

Je remplis un devoir agréable en remerciant les constructeurs cités dans cette étude de l'aide qu'ils m'ont apportée en me communiquant les détails intéressants de leurs systèmes. Je leur dois, ainsi qu'aux éditeurs des ouvrages cités dans la bibliographie, toute ma gratitude pour les clichés qu'ils ont prêtés à la Société Française des Electriciens et qui ont été d'un recours précieux pour l'impression des figures.

Bibliographie

Exposé des applications de l'Electricité, par le Comte Th. du Moncel. — Eug. Lacroix, Paris, 1872-1878.

Die elektrischen Uhren, von Dr Schneebeli. — Orell-Füssli et Cie, Zurich, 1878.

Die elektrischen Uhren, in allgemein verständlicher Darstellung, für Uhrmacher, Elektrotechniker, Mechaniker, Ingenieure und das gebildete Publikum, von A. Merling. — Vieweg und Son, Braunschweig, 1884.

La Pendule électrique de précision de Hipp, par le Dr Hirsch. — Neuchâtel, 1884-1889.

Die Präcisions-Uhren mit wollkommen freiem Echappement und neuem Quecksilber-Compensationspendel, von S. Riefler. — München, C. Wolf et Sohn, 1894.

La Synchronisation électromagnétique, par A. Cornu, Membre de l'Institut. Conférence faite devant la Société Internationale des Electriciens, en 1894.

L'Electro-aimant et l'Electro-mécanique, par Silvanus-P. Thompson, traduction française par E. Boistel. — J. Fritsch, Paris, 1895.

Digitized by Google

L'Horlogerie électrique à l'Exposition universelle de 1900, par P. DEGRESSAIN. — Revue chronométrique, Paris.

Horloge électrique système R. Thury, par H. CUENOD, ingénieur-constructeur, Genève.

Comptes-rendus des travaux du Congrès international de chronométrie à l'Exposition universelle de 1900. — Gauthier-Villars, Paris.

Horloges-mères et installations horaires, par Ch. PONCET, directeur de l'Ecole Nationale d'Horlogerie de Cluses.

L'heure à Paris, par Jean MASCART, astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris. — Gauthier-Villars, Paris, 1907.

Präcisions-Pendeluhren und Zeitdienstanlagen für Sternwarten, von Dr S. RIEFLER. — Theodor Ackermann, München, 1907.

Electrotechnik für Uhrmacher, von Johannès ZACHARIAS, ingénieur. — Carl Marfels, A. G. Berlin, 1908.

Die elektrischen Uhren, von Dr TOBLER, zweite Auflage, bearbeitet von Johannès ZACHARIAS, ingénieur. — Hartleben, Wien und Leipzig, 1909.

Initiation de l'Horloger à l'Electricité et à ses applications, par Albert BERNER. — Inventions-Revue, La Chaux de Fonds, 1910.

Le Génie Civil, Nos d'août et 3 septembre 1910 : « L'Horlogerie électrique», par M. BEACHE.

Hilfsbuch für Elektropraktiker, Bearbeitet von C. ERFURTH und B. KONUGSMANN, 1ter Band : Schwachstrom, vierzehnte Auflage. — Hachmeister und Thal, Leipzig, 1913.

Rapports techniques de l'Exposition Nationale Suisse de 1914 *à Berne*. — Orell-Füssli, 1914.

Traité d'Horlogerie moderne de Claudius Saunier. — Hübners Verlag, Bautzen.

Pendule, Spiral, Diapason, par H. BOUASSE, 2 vol. — Delagrave, Paris.

Histoire de la Pendulerie neuchâteloise, par Al. CHAPUIS et divers collaborateurs — Attinger Frères, Paris et Neuchâtel, 1917.

Modern Electric Time Service. — Conférence faite devant l'Institution of electrical Engineers en 1910 par F. HOPEJONES. — M. I.E. E.

Agendas de l'Horloger. — Magron, éditeur à Bienne.

Nouveautés en Electrochronométrie, par A. WAELTI. — Magron, Bienne, 1921.

Génie Civil, N° du 27 août 1921.

La Compensation des Horloges et des Montres, procédés nouveaux fondés sur l'emploi des aciers au nickel, par Ch. Ed. GUILLAUME, directeur du Bureau international des Poids et Mesures. — Editions Forum. Neuchâtel, Genève et Paris.

La France Horlogère, N° du 15 juin 1921 : *Nouvelle Pendule électrique*, par Ch. PONCET, directeur de l'Ecole Nationale d'Horlogerie de Cluses. — Paris et Besançon, 1921.

Revue générale de l'Electricité (organe de l'Union des Syndicats de l'Electricité). Paris, 1922-1923 : *Les Progrès récents de l'Horlogerie électrique*, par Marius LAVET, ingénieur (numéros de décembre 1922 de ladite Revue).

Revue de l'Ingénieur, N° de mars 1923.

L'Electricité et ses applications à la chronométrie, par A. FAVARGER, Neuchâtel, 1924.

L'Horloger électricien, par Albert BERNER. — Librairie Desforges, Paris.

L'Horloge électrique Bulle-Clock, par M. BOUSQUET. La Nature, 8 mai 1926.

Causeries sur l'horlogerie électrique, par E. GARLANDIER. *La France horlogère*, Nos de mai et juin 1927.

La remise à l'heure automatique par T. S. F., par G. HARRISSEL. *La Science et la Vie*. Décembre 1922.

Analogies mécaniques de l'électricité, par M. J. B. POMEY, Gauthier-Villars, Paris, 1921. Voir page 107 une très intéressante théorie de l'horloge Féry-Brillié.

L'Electricien, 15 février 1925-1er mars 1925-15 novembre 1926. 3 articles par M. G. MALGORN.

La Science et la Vie, N° de janvier 1923 et de juin 1927.

Je Sais Tout, N° de janvier 1927.

Digitized by Google

Digitized by Google

ERREUR INTRODUITE PAR LES TRANSFORMATEURS DANS LA MESURE D'UNE PUISSANCE (ET D'UNE ENERGIE)

par A. Iliovici.

L'auteur établit une formule générale pour l'erreur introduite par les transformateurs de mesure dans la mesure d'une puissance ou d'une énergie complexe, active ou réactive.

Il montre que la formule est valable pour les circuits monophasés et polyphasés, si on donne dans chaque cas une signification appropriée à ses termes.

On connaît la formule qui donne l'erreur introduite par les transformateurs de mesure dans la mesure de la puissance active d'un circuit monophasé.

On a établi aussi la formule correspondante pour un circuit triphasé et la puissance active(1), mais cette formule se présente sous une forme compliquée ; on a aussi établi une formule analogue pour la puissance réactive d'un circuit triphasé (2), mais seulement dans un cas particulier.

Nous nous proposons, dans ce qui suit, d'établir *une formule générale*, donnant l'erreur dans la mesure de la *puissance complexe* d'un circuit monophasé ou polyphasé. La considération des composantes symétriques du courant, de la tension et de la puissance, nous permettra de donner à cette formule une forme simple et d'en tirer quelques conclusions intéressantes.

I. — *Circuit monophasé.* Soit à mesurer une *puissance complexe d'angle* α :

$$P_\alpha = U_1 I_1 \cos(\varphi - \alpha), \tag{1}$$

(1) Voir J. Goldstein, Die Zusamensetzung der Enzelfehler des Messwandler (*Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens*, novembre 1920). — Analyse de l'article (*Revue générale de l'Electricité*, novembre 1920, p. 304-312).

(2) Voir M. Peltier, Comparaison des erreurs dues aux transformateurs de mesure (*Revue générale de l'Electricité*, 19 février 1927).

Digitized by Google

U_1 et I_1 étant les valeurs efficaces de la tension et du courant dans le circuit, supposé monophasé, φ le déphasage entre ces deux grandeurs, α un angle qui caractérise la puissance.

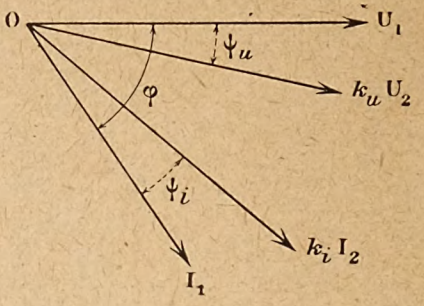


Fig. 1.

Supposons que la mesure est faite à l'aide d'un wattmètre de puissance complexe, alimenté par un transformateur de tension dont le *rapport de transformation nominal est* k_u et par un transformateur de courant dont le *rapport de transformation nominal est* k_i, et soient respectivement ψ_u, ψ_i les déphasages entre la tension secondaire U_2 et la tension primaire U_1 d'une part, et entre le courant secondaire I_2 et le courant primaire I_1 d'autre part (1).

La puissance déduite des indications de ce wattmètre, en tenant compte des rapports de transformation k_u et k_i sera (voir fig. 1)

$$(1') \qquad P'_2 = k_u k_i U_2 I_2 \cos(\varphi - \alpha - \psi_u - \psi_i).$$

L'erreur introduite par les transformateurs sera :

$$(2) \qquad \tau_i = \frac{P'_2 - P_2}{P_2} = \left[\frac{k_u U_2}{U_1} \cdot \frac{k_i I_2}{I_1} \cdot \frac{\cos(\varphi - \alpha - \psi_u - \psi_i)}{\cos\varphi} - 1\right].$$

Si ε_u et ε_i sont les erreurs introduites par les transformateurs dans la mesure de la tension et du courant, on a :

$$(3) \qquad \varepsilon_u = \frac{k_u U_2 - U_1}{U_1} \qquad \text{et} \qquad (4) \qquad \varepsilon_i = \frac{k_i I_2 - I_1}{I_1},$$

(1) Par convention ψ_u est considéré comme *positif* si U_2 est déphasé *en arrière* sur U_1 ; par contre ψ_i est *positif* si I_2 est déphasé *en avance* sur I_1 (fig. 1).

Digitized by Google

d'où on déduit :

$$(3') \quad \frac{k_u U_2}{U_1} = 1 + \varepsilon_u \qquad \text{et} \qquad (4') \quad \frac{k_i I_2}{I_1} = 1 + \varepsilon_i.$$

On a, d'autre part :

$$(5) \quad \frac{\cos(\varphi - \alpha - \psi_u - \psi_i)}{\cos(\varphi - \alpha)} = \cos(\psi_u + \psi_i) + \sin(\psi_u + \psi_i)\,\mathrm{tg}\,(\varphi - \alpha) \leq 1 + (\psi_u + \psi_i)\,\mathrm{tang}\,(\varphi - \alpha),$$

ψ_u et ψ_i *étant exprimés en radians.*

En remplaçant dans la formule (2) on trouve :

$$\eta = (1 + \varepsilon_u)(1 + \varepsilon_i)[1 + (\psi_u + \psi_i)\,\mathrm{tg}\,(\varphi - \alpha)] - 1,$$

ou :

$$(6) \qquad \eta = \varepsilon_u + \varepsilon_i + (\psi_u + \psi_i)\,\mathrm{tg}\,(\varphi - \alpha),$$

en négligeant les termes qui contiennent les produits 2 à 2 des ε et ψ, ces termes étant des infiniment petits de second ordre.

Si on pose :

$$\varepsilon_u + \varepsilon_i = \varepsilon \qquad \text{et} \qquad \psi_u + \psi_i = \psi$$

on obtient la formule plus condensée :

$$(7) \qquad \eta = \varepsilon + \psi\,\mathrm{tang}\,(\varphi - \alpha),$$

dans laquelle ε est la somme des erreurs introduites par les deux transformateurs dans la mesure de la tension et du courant (1), ψ la somme des deux déphasages en radians.

Cas particuliers. — 1° *Puissance active.* — On a $\alpha = 0$ et les formules (6) et (7) deviennent :

$$(6') \quad \eta = \varepsilon_u + \varepsilon_i + (\psi_u + \psi_i)\,\mathrm{tang}\,\varphi \qquad \text{et} \qquad (7') \quad \eta = \varepsilon + \psi\,\mathrm{tang}\,\varphi.$$

2° *Puissance réactive.* — On a $\alpha = \frac{\pi}{2}$ et les formules (6) et (7) deviennent :

$$(6'') \quad \eta = \varepsilon_u + \varepsilon_i - (\psi_u + \psi_i)\,\mathrm{cotg}\,\varphi \qquad \text{et} \qquad (7'') \quad \eta = \varepsilon - \psi\,\mathrm{cotg}\,\varphi.$$

II. — *Circuit triphasé.* — Nous allons montrer que les formules (6) et (7) et celles qui en dérivent s'appliquent aussi aux circuits triphasés

(1) L'erreur ε est aussi l'erreur introduite par les transformateurs dans la mesure de la puissance, pour $\varphi = \alpha$.

Digitized by Google

(et en général aux circuits polyphasés) ε_u et ε_i étant, dans les conditions de la pratique, les valeurs moyennes des erreurs introduites par tous les transformateurs de même nature dans la mesure des tensions et des courants, ψ_u et ψ_i étant, en radians, les valeurs moyennes des déphasages de ces transformateurs. Nous supposons, pour simplifier, que les tensions et les courants primaires sont équilibrés et nous désignons par π_2 la puissance complexe d'angle α.

Avec l'hypothèse admise on a :

$$\pi_2 = 3U_1 I_1 \cos(\varphi - \alpha) = 3P_2, \tag{8}$$

U_1 et I_1 étant les valeurs efficaces de la tension et du courant dans une phase, φ le déphasage entre ces grandeurs, P_2 la puissance complexe d'une phase.

a) Les transformateurs de tension sont identiques et il en est de même des transformateurs de courant. Dans ce cas, les systèmes formés par les tensions secondaires d'une part et par les courants secondaires d'autre part, sont équilibrés. Avec les notations adoptées pour le cas I, on aura pour la puissance π'_2 déduite des indications des wattmètres placés dans les secondaires des transformateurs, l'expression :

$$\pi'_2 = 3k_u k_i U_2 I_2 \cos(\varphi - \alpha - \psi_u - \psi_i) = 3P'_2. \tag{8'}$$

L'erreur introduite par les transformateurs dans la mesure de la puissance complexe π_2 sera :

$$\eta_1 = \frac{\pi'_2 - \pi_2}{\pi_2}$$

et en tenant compte de (8) et (8') :

$$\eta_1 = \frac{P'_2 - P_2}{P_2}.$$

Il en résulte que l'erreur dans le cas considéré est la même que dans les circuits monophasés; elle sera donc donnée par les formules (6), (7), (6'), (7') ou (6''), (7''), suivant la nature de la puissance qu'il s'agit de mesurer.

b) Les transformateurs sont quelconques : On emploie 3 transformateurs de tension et 3 transformateurs de courant. Nous supposons d'abord que les trois transformateurs de tension et les trois transfor-

Digitized by Google

mateurs de courants sont montés dans les 3 phases du circuit. Nous verrons dans la suite que cette restriction n'est pas nécessaire et nous étudierons aussi le cas où on n'emploie que deux transformateurs de tension et deux transformateurs de courant.

Soient ε'_u, ε''_u, ε'''_u, les erreurs introduites par les transformateurs de tension dans la mesure de celles-ci, ψ'_u, ψ''_u, ψ'''_u, leurs angles de déphasage; ε'_i, ε''_i, ε'''_i et ψ'_i, ψ''_i, ψ'''_i, les grandeurs correspondantes pour les transformateurs de courant.

Nous supposons toujours que les tensions et les courants primaires sont équilibrés, mais les tensions et les courants secondaires ne le sont plus à cause des déséquilibrages introduits par les transformateurs.

On sait qu'une puissance complexe d'angle α non équilibrée π'_2, est la somme d'une *puissance directe* π^d_2, d'une *puissance inverse* π^i_2 et d'une *puissance résiduelle* π^r_2.

On a :

$$\pi'_2 = \pi^d_2 + \pi^i_2 + \pi^r_2 ; \tag{9}$$

d'autre part les expressions de π^d_2, π^i_2 et π^r_2 sont respectivement :

$$\pi^d_2 = 3 k_u k_i U^d_2 I^d_2 \cos(\varphi_d - \alpha), \tag{10}$$

$$\pi^i_2 = 3 k_u k_i U^i_2 I^i_2 \cos(\varphi_i - \alpha), \tag{11}$$

$$\pi^r_2 = 3 k_u k_i U^r_2 I^r_2 \cos(\varphi_r - \alpha), \tag{12}$$

U^d_2, U^i_2, U^r_2, étant les composantes directe, inverse et résiduelle du système de tensions secondaires; I^d_2, I^i_2, I^r_2, les mêmes composantes des courants secondaires; φ_d, φ_i, φ_r, les déphasages entre I^d_2 et U^d_2, entre I^i_2 et U^i_2, et entre I^r_2 et U^r_2. Il est à remarquer que π'_2, π^d_2, π^i_2 et π^r_2 sont les puissances déduites des indications des wattmètres placés dans les secondaires des transformateurs.

L'erreur introduite par les transformateurs dans la mesure de π_2 est :

$$\eta = \frac{\pi'_2 - \pi_2}{\pi_2} = \frac{(\pi^d_2 - \pi_2) + \pi^i_2 + \pi^r_2}{\pi_2}. \tag{13}$$

Or, les déséquilibrages introduits par les transformateurs sont très faibles; il en résulte que les composantes inverses et résiduelles :

$$U^i_2,\ I^i_2,\ U^r_2,\ I^r_2$$

sont des infiniment petits, et les puissances π^i_2 et π^r_2 qui contiennent leurs produits deux à deux sont des infiniment petits du second ordre,

Digitized by Google

par conséquent négligeables devant $(\pi_2' - \pi_2)$ qui est, comme nous le verrons, de premier ordre par rapport aux ε et aux ψ.

Il résulte de ce qui précède que la formule (13) peut s'écrire, avec une approximation suffisante :

$$\eta = \frac{\pi_2' - \pi_2}{\pi_2}. \qquad (13')$$

L'erreur sur la puissance est égale à l'erreur sur sa composante directe.

Or la puissance π_{12}' est une puissance équilibrée; il en résulte que l'erreur η est donnée par les formules (6) et (7) et leurs variantes (6'), (7') ou (6''), (7''), appliquées à la composante directe de la puissance.

On peut remarquer que le raisonnement précédent s'applique à un circuit polyphasé quelconque; les formules (6) et (7) sont donc tout à fait générales.

Il y a lieu seulement de préciser la signification de ε_u, ε_i, ψ_u, ψ_i et de ε, ψ dans le cas des circuits polyphasés; ε_u et ε_i étant les erreurs introduites par les transformateurs dans la mesure des composantes directes de la tension et du courant, on a, par définition :

$$\varepsilon_u = \frac{k_u U_2' - U_1}{U_1} \qquad \text{et} \qquad \varepsilon_i = \frac{k_i I_2' - I_1}{I_1} \qquad (14) \quad (15)$$

et

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_i. \qquad (16)$$

De même ψ_u et ψ_i sont ici les déphasages entre U_2' et U_1, et entre I_2' et I_1, tandis qu'on a : $\psi = \psi_u + \psi_i$ (17).

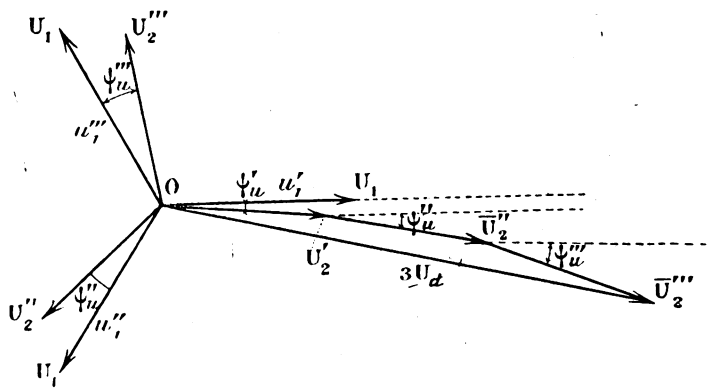


Fig. 2. — Relation entre les erreurs et les déphasages (6 transformateurs).

Relation entre ε_u, ε_i, ψ_u, ψ_i et les erreurs et déphasages des transformateurs : ε'_u, ε''_u..., ε'_i..., ψ'_u..., ψ'_i... Soit (figure 2) u'_1, u''_1, u_m,

Digitized by Google

les trois tensions primaires, de même valeur efficace U_1, et déphasées entre elles de 120°, u'_2, u''_2, u'''_2, les trois tensions secondaires de valeurs efficaces U'_2, U''_2, U'''_2, déphasées respectivement par rapport aux tensions primaires de ψ'_u, ψ''_u, ψ'''_u.

On sait que, si on fait tourner U''_2 dans le sens trigonométrique de $\frac{\pi}{3}$ et U'''_2 de $\frac{2\pi}{3}$, la résultante du vecteur U'_1 et des deux vecteurs $U''_2\left(\frac{\pi}{3}\right)$ et $U'''_2\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ ainsi obtenus représente $3U^d_2$ (fig. 2).

De la fig. 2, on tire immédiatement les deux relations :

$$3U^d_2 \cos\psi_u = U'_2 \cos\psi'_u + U''_2 \cos\psi''_u + U'''_2 \cos\psi'''_u$$

et

$$3U^d_2 \sin\psi_u = U'_2 \sin\psi'_u + U''_2 \sin\psi''_u + U'''_2 \sin\psi'''_u.$$

Les angles étant très petits on peut écrire les formules précédentes sous les formes suivantes :

1°
$$3U^d_2 = U'_2 + U''_2 + U'''_2$$

d'où on tire la relation :

(18)
$$U^d_2 = \frac{U'_2 + U''_2 + U'''_2}{3};$$

et

2°
$$3U^d_2\psi_u = U'_2\psi'_u + U''_2\psi''_u + U'''_2\psi'''_u$$

d'où on tire :

(19)
$$\psi_u = \frac{U'_2\psi'_u + U''_2\psi''_u + U'''_2\psi'''_u}{3U^d_2}.$$

Or on a, par définition, des erreurs :

$$\varepsilon'_u = \frac{k_u U'_2 - U_1}{U_1}, \qquad \varepsilon''_u = \frac{k_u U''_2 - U_1}{U_1} \qquad \text{et} \qquad \varepsilon'''_u = \frac{k_u U'''_2 - U_1}{U_1};$$

on en déduit :

(20) $U'_2 = (1 + \varepsilon'_u)U_1$, (20′) $U''_2 = (1 + \varepsilon''_u)U_1$

et (20″) $U'''_2 = (1 + \varepsilon'''_u)U_1$.

En remplaçant dans la formule (18) on obtient :

(18′)
$$U^d_2 = \left(1 + \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u + \varepsilon'''_u}{3}\right)U_1.$$

Or de la formule (14) on déduit :

(14′)
$$U^d_2 = (1 + \varepsilon_u)U_1.$$

Digitized by Google

Il résulte de (18′) et (14′) que :

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u + \varepsilon'''_u}{3}. \tag{21}$$

L'erreur ε_u sur la composante directe du système de tensions secondaires, est la moyenne des erreurs introduites par les trois transformateurs de tension dans la mesure de celles-ci.

En remplaçant de même, dans la formule (19), U'_2, U''_2, U'''_2, par leurs valeurs données par les formules (20), (20′), (20″); on obtient la relation :

$$\psi_u = \frac{[(1+\varepsilon'_u)\psi'_u + (1+\varepsilon''_u)\psi''_u + (1+\varepsilon'''_u)\psi'''_u]U_1}{3U_2^d}$$

ou, en tenant compte de (14′) :

$$\psi_u = \frac{(1+\varepsilon'_u)\psi'_u + (1+\varepsilon''_u)\psi''_u + (1+\varepsilon'''_u)\psi'''_u}{3(1+\varepsilon_u)}.$$

Or ε_u, ε'_u, ... sont négligeables devant l'unité; on a donc :

$$\psi_u = \frac{\psi'_u + \psi''_u + \psi'''_u}{3}. \tag{22}$$

Le déphasage de la composante directe du système de tensions secondaires, est la moyenne des déphasages des trois transformateurs de tension.

On trouvera des résultats analogues pour les transformateurs de courants. On a donc les relations :

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon'_i + \varepsilon''_i + \varepsilon'''_i}{3}; \tag{23}$$

et

$$\psi_i = \frac{\psi'_i + \psi''_i + \psi'''_i}{3}. \tag{24}$$

Remarque. — Pour établir les formules de ce paragraphe, nous avons supposé qu'à chaque phase du circuit correspondait un transformateur de tension et un de courant. Cette restriction n'est pas nécessaire; il suffit que les transformateurs soient montés d'une façon symétrique, tel qu'on le fait habituellement. Ainsi les transformateurs de courant pourront être montés dans les 3 fils de ligne et les transformateurs de tension entre les fils (tension composée).

Ceci résulte du fait que dans les formules n'interviennent que les

Digitized by Google

erreurs sur les composantes directes des courants et des tensions, et leurs déphasages. Supposons que les transformateurs de tension se trouvent alimentés par les tensions composées; les composantes directes des tensions composées secondaires comporteront une certaine erreur et seront déviées d'un certain angle. Comme ces composantes directes des tensions composées forment des triangles équilatéraux dont les tensions simples sont les médianes, celles-ci comporteront la même erreur et le même déphasage.

c) Les transformateurs sont quelconques : on emploie deux transformateurs de tension et deux transformateurs de courant. Ce cas est équivalent au précédent, sauf que les trois tensions secondaires ont une résultante nulle, de même que les trois courants secondaires, le troisième courant ou la troisième tension étant respectivement la résultante des deux autres.

Soient ε'_u, ε''_u, ε'_i, ε''_i, les erreurs des deux transformateurs de tension et des deux transformateurs de courant, ψ'_u, ψ''_u, ψ'_i, ψ''_i, leurs déphasages. Les erreurs ε'''_u, ε'''_i et les angles ψ'''_u et ψ'''_i résultent de la combinaison des grandeurs précédentes imposée par le fait que le courant i'''_2 est la résultante des courants i'_2 et i''_2 ; de même que la tension u'''_2 est la résultante des tensions u'_2 et u''_2. Pour trouver les

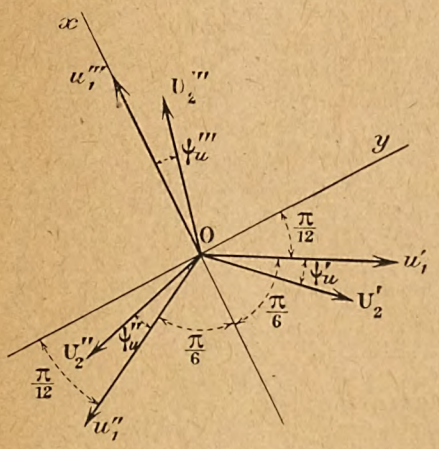


Fig. 3. — Relation entre les erreurs et les déphasages (4 transformateurs).

relations entre les ε et ψ ci-dessus, traçons (fig. 3) le diagramme des tensions primaires et secondaires et écrivons que les sommes des pro-

Digitized by Google

jections des vecteurs U'_2, U''_2, U'''_2, sur les directions Ox et Oy sont nulles.

On trouve les deux relations :

$$(25) \qquad U'''_2 \cos \psi'''_u = U'_2 \cos\left(\frac{\pi}{6} - \psi'_u\right) + U''_2 \cos\left(\frac{\pi}{6} + \psi''_u\right)$$

et

$$(26) \qquad U'''_2 \sin \psi'''_u = U''_2 \cos\left(\frac{\pi}{12} - \psi''_u\right) - U'_2 \cos\left(\frac{\pi}{12} + \psi'_u\right).$$

De la relation (25) on déduit successivement :

$$U'''_2 \cos \psi'''_u = (U'_2 \cos \psi'_u + U''_2 \cos \psi''_u) \cos \frac{\pi}{6} + (U'_2 \sin \psi'_u - U''_2 \sin \psi''_u) \sin \frac{\pi}{6}$$

$$U'''_2 \cos \psi'''_u = \frac{U'_2 \cos \psi'_u + U''_2 \cos \psi''_u}{2} + \frac{(U'_2 \sin \psi'_u \quad U''_2 \sin \psi''_u)\sqrt{3}}{2}.$$

Les angles ψ'_u, ψ''_u, ψ'''_u, étant très petits on a :

$$\cos \psi'_u \leqq \cos \psi''_u \leqq \cos \psi'''_u \leqq 1$$

et

$$\sin \psi'_u \leqq \psi'_u, \qquad \sin \psi''_u \leqq \psi''_u, \qquad \sin \psi'''_u \leqq \psi'''_u;$$

la relation précédente devient, dans ces conditions :

$$(25') \qquad U'''_2 = \frac{U'_2 + U''_2}{2} + \frac{(U'_2\psi'_u - U''_2\psi''_u)\sqrt{3}}{2}.$$

Or :

$$U'_2 = (1 + \varepsilon'_u)U_1, \qquad U''_2 = (1 + \varepsilon''_u)U_1 \qquad \text{et} \qquad U'''_2 = (1 + \varepsilon'''_u)U_1$$

donc :

$$\frac{U'_2 + U''_2}{2} = \left(1 + \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u}{2}\right)U_1$$

et

$$\frac{(U'_2\psi'_u - U''_2\psi''_u)\sqrt{3}}{2} = \frac{[(1 + \varepsilon'_u)\psi'_u - (1 + \varepsilon''_u)\psi''_u]\sqrt{3}}{2}$$

ou encore :

$$\frac{(U'_2\psi'_u - U''_2\psi''_u)\sqrt{3}}{2} = \frac{(\psi'_u - \psi''_u)\sqrt{3}}{2}$$

en négligeant les produits $\varepsilon'_u\psi'_u$ et $\varepsilon''_u\psi''_u$.

En remplaçant dans (25') on trouve :

$$1 + \varepsilon'''_u = 1 + \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u}{2} + \frac{(\psi'_u - \psi''_u)\sqrt{3}}{2}$$

d'où on déduit :

$$\varepsilon'''_u = \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u}{2} + \frac{(\psi'_u - \psi''_u)\sqrt{3}}{2}.$$

Digitized by Google

En remplaçant dans la formule (21) on trouve :

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u + \varepsilon'''_u}{3} = \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u + \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u}{2} + \frac{(\psi'_u - \psi''_u)\sqrt{3}}{2}}{3}$$

ou :

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u}{2} + \frac{(\psi'_u - \psi''_u)}{2\sqrt{3}}. \tag{27}$$

On trouvera par une méthode identique :

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon'_i + \varepsilon''_i}{2} + \frac{(\psi'_i - \psi''_i)}{2\sqrt{3}}. \tag{28}$$

La formule (26) donne successivement :

$$U'''_2 \sin \psi'''_u = (U'_2 \cos \psi''_u - U'_2 \cos \psi'_u) \cos \frac{\pi}{12} + (U''_2 \sin \psi''_u + U'_2 \sin \psi'_u) \sin \frac{\pi}{12}$$

$$U'''_2 \psi'''_u = (U''_2 - U'_2)\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{U''_2 \psi''_u + U'_2 \psi'_u}{2},$$

et en remplaçant U'_2, U''_2, U'''_2 par leur expression en fonction de U_1, on trouve, en simplifiant par U_1 :

$$(1 + \varepsilon'''_u)\psi'''_u = \frac{(\varepsilon''_u - \varepsilon'_u)\sqrt{3}}{2} + \frac{(1 + \varepsilon''_u)\psi''_u + (1 + \varepsilon'_u)\psi'_u}{2}$$

et en négligeant ε'_u, ε''_u et ε'''_u devant l'unité :

$$\psi'''_u = \frac{\psi'_u + \psi''_u}{2} + \frac{(\varepsilon''_u - \varepsilon'_u)\sqrt{3}}{2}.$$

En remplaçant dans (22) on trouve après réductions et simplifications :

$$\psi_u = \frac{\psi'_u + \psi''_u}{2} + \frac{\varepsilon''_u - \varepsilon'_u}{2\sqrt{3}}. \tag{29}$$

On trouvera de même :

$$\psi_i = \frac{\psi'_i + \psi''_i}{2} + \frac{\varepsilon''_i - \varepsilon'_i}{2\sqrt{3}}. \tag{30}$$

Dans le cas de l'emploi de deux transformateurs on peut donc encore appliquer les formules (6) et (7) et leurs cas particuliers (6'), (7') et (6''), (7''), les valeurs de ε_u, ε_i, ψ_u et ψ_i étant données par les formules (27), (28), (29) et (30).

Dans la pratique on emploie des transformateurs de même modèle et de mêmes calibres; ces transformateurs sont donc peu différents, de sorte qu'on peut négliger $\frac{\psi''_u - \psi'_u}{\sqrt{3}}$ devant $(\varepsilon'_u + \varepsilon''_u)$ et $\frac{\varepsilon''_u - \varepsilon'_u}{\sqrt{3}}$ devant $(\psi''_u - \psi'_u)$, etc.

Digitized by Google

Dans ce cas les formules (27), (28), (29) et (30) se simplifient et deviennent :

$$(27') \quad \varepsilon_u = \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u}{2}; \qquad (28') \quad \varepsilon_i = \frac{\varepsilon'_i + \varepsilon''_i}{2}; \qquad (29') \quad \psi_u = \frac{\psi'_u + \psi''_u}{2}$$

et

$$(30') \quad \psi_i = \frac{\psi'_i + \psi''_i}{2}.$$

Dans les conditions pratiques ε_u *et* ε_i *sont respectivement les moyennes des* ε'_u *et* ε''_u, *et de* ε'_i *et* ε''_i *des transformateurs; il en est de même pour* ψ_u *et* ψ_i.

Remarques. — 1° Des formules (6), (7), (21) à (24) et (27) à (30), et des raisonnements qui ont permis d'y aboutir, il résulte que l'erreur η dans le cas des circuits polyphasés dépend surtout du déphasage φ entre les courants et les tensions correspondantes, et de l'angle α, c'est-à-dire de la nature de la puissance qu'on mesure, active, réactive ou complexe; elle dépend aussi des erreurs des transformateurs et de leurs angles de phase... mais *elle est indépendante de la méthode de mesure et, pratiquement aussi de la façon dont ces transformateurs sont montés.*

En ce qui concerne la méthode de mesure, il faut évidemment que celle-ci mesure correctement la puissance dans le cas des tensions et des courants non équilibrés; sinon la mesure de la puissance secondaire ne serait pas exacte lorsque les transformateurs introduisent un déséquilibrage, c'est-à-dire dans les cas examinés en *b*) et en *c*).

Les résultats sont exacts aussi *pour les méthodes qui supposent les tensions seules équilibrées* les courants étant quelconques, ou inversement. On démontre en effet, que ces méthodes mesurent une grandeur de la forme $\pi^d_\alpha + k'\pi^i_{\alpha'} + k''\pi^r_{\alpha''}$, π^d_α étant la composante directe de la puissance à mesurer, $\pi^i_{\alpha'}$, la composante inverse d'une puissance complexe d'angle α' égal ou différent de α, produite par la tension et le courant inverse du circuit donné, $\pi^{\alpha''}_u$ la composante résiduelle d'une puissance complexe d'angle α'' des mêmes tensions et courants, k et k' étant des constantes. Or, dans les formules n'intervient, comme on l'a vu, que la composante π^d_α de la puissance, les deux autres composantes étant des infiniment petits d'ordre supérieur.

Il résulte de ce qui précède, que les formules considérées s'appliquent aux méthodes employées habituellement pour la mesure de la puissance active — méthode des 3 wattmètres dans les circuits à 4 fils, méthode des 2 wattmètres dans les circuits à 3 fils; — aux mêmes mé-

Digitized by Google

thodes pour la mesure de la puissance réactive et de la puissance complexe, avec des wattmètres comportant des éléments réactifs ou complexes; à la méthode des trois wattmètres pour la mesure de la puissance réactive, et aux méthodes de deux wattmètres que nous en avons déduites (1); elle s'applique aussi aux méthodes de mesure de la puissance complexe dans lesquelles on obtient l'angle α par un choix approprié des tensions qui alimentent les wattmètres.

2° Dans la pratique on emploie quelquefois des méthodes de mesure qui supposent équilibrés les courants et les tensions; telle est par exemple la méthode dans laquelle on n'emploie qu'un seul wattmètre pour la mesure de la puissance réactive, le circuit ampèremétrique se trouvant dans un fil de ligne et le circuit voltmétrique entre les deux autres fils; telle est aussi une méthode de deux wattmètres dans laquelle les wattmètres sont montés comme celui indiqué précédemment, les circuits ampèremétriques se trouvant dans deux fils de ligne.

Si les transformateurs de tension sont identiques entre eux et les transformateurs de courants identiques entre eux, la méthode de mesure est exacte aux primaires et aux secondaires des transformateurs, et les formules (6) et (7) s'appliquent en tenant compte de ce qui est indiqué en *a*).

Mais si les transformateurs de tension ou ceux de courant ne sont pas identiques, les tensions ou les courants secondaires ne sont pas équilibrés; alors la mesure de la puissance secondaire n'est plus exacte, d'où une erreur supplémentaire à celle donnée par (6) et (7).

Pourtant les transformateurs employés pratiquement dans un même circuit étant peu différents, les déséquilibrages des tensions et des courants secondaires sont faibles et les formules (6) et (7), (6′) et (7′), (6″) et (7″), s'appliquent aussi dans ce cas, ψ_u, ψ_i, ε_u, ε_i étant les valeurs moyennes des angles de phases et des erreurs des transformateurs [formules (21) à (24) et (27′) à (30′)].

Donc dans la pratique ces formules sont tout à fait générales.

Résumé. — L'erreur η introduite par les transformateurs dans la

(1) Voir ILIOVICI. Définition et mesure de la puissance (Semaine d'octobre 1924, Société des Electriciens) et Mesure de la puissance et de l'énergie réactive (Semaine d'octobre 1925).

Digitized by Google

mesure d'une puissance complexe P_z est donnée par la formule générale :

$$(6) \qquad \eta = \varepsilon_u + \varepsilon_i + (\psi_u + \psi_i) \operatorname{tg} (\varphi - \alpha)$$

qu'on peut écrire sous la forme condensée :

$$(7) \qquad \eta = \varepsilon + \psi \operatorname{tang} (\varphi - \alpha),$$

en posant

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_i \qquad \text{et} \qquad \psi = \psi_u + \psi_i;$$

ces formules sont valables en circuits monophasés et polyphasés.

Dans tous les cas, φ est le déphasage des courants primaires sur les tensions correspondantes, les circuits primaires étant supposés équilibrés; α l'angle qui caractérise la puissance complexe.

Dans les circuits monophasés ε_u et ε_i représentent les erreurs introduites par les transformateurs dans la mesure d'une tension et d'un courant; ψ_u et ψ_i les angles de déphasage des transformateurs.

Dans les circuits polyphasés ε_u et ε_i sont les erreurs que les transformateurs introduisent dans la mesure des *composantes directes* des tensions et des courants ; ψ_u et ψ_i les déphasages des *composantes directes* secondaires sur les tensions et les courants primaires.

On a pratiquement :

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon'_u + \varepsilon''_u + \ldots + \varepsilon^n_u}{n}, \qquad \varepsilon_i = \frac{\varepsilon'_i + \varepsilon''_i + \ldots + \varepsilon^{n'}_i}{n'}$$

$$\psi_u = \frac{\psi'_u + \psi''_u + \ldots + \psi^n_u}{n}, \qquad \psi_i = \frac{\psi'_i + \psi''_i + \ldots + \psi^{n'}_i}{n'},$$

n étant le nombre de transformateurs de tension, n' le nombre de transformateurs de courant utilisés; ε'_u, ε''_u, ... les erreurs introduites par les transformateurs de tension dans la mesure de celles-ci; ε'_i, ε''_i, ... les erreurs des transformateurs de courant dans la mesure de ceux-ci; ψ'_u, ψ''_u, ..., ψ'_i, ψ''_i, ... les déphasages des transformateurs.

Pour la puissance active les formules (6) et (7) deviennent :

$$(6') \quad \eta = \varepsilon_u + \varepsilon_i + (\psi_u + \psi_i) \operatorname{tg} \varphi \qquad \text{et} \qquad (7') \quad \eta = \varepsilon + \psi \operatorname{tg} \varphi$$

et pour la puissance réactive :

$$(6'') \quad \eta = \varepsilon_u + \varepsilon_i - (\psi_u + \psi_i) \operatorname{cotg} \varphi \qquad \text{et} \qquad (7'') \quad \eta = \varepsilon - \psi \operatorname{cotg} \varphi.$$

L'Imprimeur-Editeur : Etienne Chiron, Paris.

Digitized by Google

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du samedi 5 novembre, p. 1326.
Admissions de Membres titulaires, p. 1326.
Distinctions aux Membres de la Société, p. 1327.
Don à la Société, p. 1327.
Annonces diverses, p. 1328.
Errata au Bulletin d'Août 1927, p. 1329.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Mesure des faibles angles de déphasage et nouveaux procédés pour les déterminer (M. VASSILLIÈRE-ARLHAC), p. 1330 — La recherche scientifique dans l'industrie en dehors des Laboratoires (M. M. LEBLANC), p. 1348. — Différences essentielles entre les méthodes des laboratoires de science pure et celles que l'on peut appliquer dans l'industrie (M. DARMOIS), p. 1354. — Le travail de recherches dans les Sociétés de production et de distribution d'électricité (M. IMBS), p. 1358. — Le travail de recherches dans les Sociétés françaises de construction électrique (M. GRATZMULLER), p. 1361. — La recherche scientifique de la Société Brown-Boveri (M. DARRIEUS), p. 1372. — Le travail de recherche à la General Electric Co (M. DUCLERT), p. 1378. — Quelques observations sur les travaux de recherche industrielle (M. LEAUTE), p. 1384. — Conclusion (M. C. FABRY), p. 1388.

Note sur le block automatique Beaumont-Creil, par M. DEBIONNE, p. 1391.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS.

a) Inauguration de l'Ecole Supérieure d'Electricité, p. 1394.
b) Visite aux installations de signalisation automatique de la Compagnie du Chemin de fer du Nord, p. 1395
c) Visite de l'Exposition de T. S. F., p. 1396.
d) Conférence du Comité Consultatif International des communications téléphoniques à grande distance, p. 1397.

TRAVAUX DES GROUPES :

Travaux du Groupe Sud-Est, p. 1398.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 1399.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1400.

IL Y A TRENTE ANS, p. 1404.

IL Y A SOIXANTE ANS, p. 1404.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Digitized by Google

COMPTES RENDUS DES REUNIONS

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 5 Novembre 1927

Présidence de M. Ch. Fabry.

La séance est ouverte à 16 heures 15.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

Beaufils (Roland), conducteur électricien chez M. Didelot, Electricité à Breuillaufa (Haute-Vienne). Domicile, 25, rue des Grandes-Bordes, Corbeil (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Fourcault et Grosselin.

Bernardeau (Henri-Jean-Gaston), licencié ès sciences, ingénieur E. S. E. (1921), attaché à la Compagnie du Chemin de fer métropolitain, 66, avenue de la République, Paris (11e). — Présenté par MM. Janet et Grosselin.

Bernstein (Germain), ingénieur stagiaire à la Compagnie Thomson-Houston, Hôtel Alhambra, rue Ernest-Renan, Saint-Ouen. — Présenté par MM. Frid et Illiovici.

Bertrand (Marcel), ingénieur à la Société Alsacienne de Constructions mécaniques à Belfort. — Présenté par MM. Roth et Belfils.

Bocquet (Emile), ancien élève de l'Ecole Polytechnique, chef de Division adjoint de l'Exploitation P. L. M. (Services techniques), 20, boulevard Diderot, Paris (12e). — Présenté par MM. Guilbert et Chaumat.

Certier (Julien-Alfred), chef de bureau de dessin à la Société alsacienne de Constructions mécaniques à Belfort, 7, rue Denfert-Rochereau, Belfort (Territoire de Belfort). — Présenté par MM. Roth et Belfils.

Chicois (Robert-André-Raoul), élève de l'E. S. E., Bord Saint-Georges, par Gouzon (Creuse). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Dupuis (Lucien-Georges), ingénieur à l'Union d'Electricité, 11, rue Bosmar, Colombes. — Présenté par MM. Fallou et Caisergues.

Durieux (Léon-Jules-Henri), ingénieur à la Société industrielle des téléphones, 4, villa Pasteur, Bois-Colombes (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Eydoux (Charles-Marie-Denis-Hyacinthe), ingénieur des Ponts et Chaussées, directeur des Etudes à l'Ecole Polytechnique, Professeur à l'Ecole Normale des Ponts et Chaussées et à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, 21, rue Descartes, Paris (5e). — Présenté par MM. Fabry et Darrieus.

Forget (Paul-Alphonse-Josué), ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécanique, ingénieur des Arts et Manufactures, 4, faubourg de Lyon, Belfort. — Présenté par MM. Roth et Belfils.

Godinot (Jacques-Marie-Jean), ingénieur aux Etablissements Merlin-Gérin, 8, quai d'Occident, Lyon. — Présenté par MM. Boutan et Rivière.

Gillet (Jean-Roger-Louis), ingénieur des Arts et Manufactures, Société alsacienne de Constructions mécaniques, 21, rue Denfert-Rochereau, Belfort. — Présenté par MM. Roth et Belfils.

Digitized by Google

Ionesco (Emile), ancien élève de l'Ecole Polytechnique de Bucarest, ingénieur E. S. E., 98, rue Buzesti, à Bucarest (Roumanie). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Joyeux (Serge-Louis-Eugène), ingénieur à l'Union d'Electricité, 187, rue de Grenelle, Paris (19e). — Présenté par MM. Fallou et Caizergues.

Kahn (Pierre-Oscar), ingénieur à la Compagnie des Lampes (Service Radio), 17, rue Saint-Georges, Paris (9e). — Présenté par MM. Varangot et Maisonneuve.

Ladonne (Arthur-Erasme-René-Michel-Paul), ingénieur à l'Energie Electrique du Sud-Ouest, 20, rue Laseppe, Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Thierry et Guirard.

Lambœuf (Charles), ingénieur à la S. A. C. M., 3, quai Vauban, Belfort. — Présenté par MM. Roth et Belfils.

Lejeune (Lucien-Léon-Jules-Louis), ingénieur E. S. E., licencié ès sciences, 8, rue de la Procession, Villemomble (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Mathieu (Henri-Antoine-Léon), directeur de l'Agence des Etablissements Merlin et Gérin, 93, avenue de Saxe, Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Boutan et Rivière.

Metzger (Louis-Joseph), directeur technique des usines diélectriques de Delle, 6, rue d'Offémont, Belfort. — Présenté par MM. E. Roth et J. Berger.

Noël (Jean-Baptiste-Louis), ingénieur I. E. G. Service électrique, Société des Mines de Lens, 19, rue Becquerel, Vendin-le-Vieil (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Millo et Maillard.

Poyeton (Jean), directeur technique, délégué de la Société des Forces Motrices du Refrain à Montbéliard (Doubs). — Présenté par MM. Roth et Wodey.

Pezopoulos (Kyriakos), officier de la Marine hellénique, ingénieur Radio E. S. E., 53, rue de Marne, Athènes (Grèce). — Présenté par MM. J. Rey et le général Ferrié.

Prokhoroff (Nicolas), élève de l'Ecole Supérieure d'Electricité, ancien élève de la Marine russe et française, 3, rue Ruhmkorff, Paris (17e). — Présenté par MM. Guilbert et Janet.

Serbesco (Demètre), ancien élève de l'Ecole Polytechnique de Bucarest, ingénieur E. S. E., 87, rue Aurel-Vlaicu, Bucarest (Roumanie). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Thovert (Jean-Marie), professeur à la Faculté des Sciences de Lyon, 81, Grande rue de Montplaisir, Lyon. — Présenté par MM. Boutan et Dumont.

Vautravers (Pierre), ingénieur à l'Union d'Electricité, 2, rue du Charolais, Paris (12e). — Présenté par MM. Fallou et Caizergues.

Voisin (Charles), ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécaniques, à Belfort, 20, rue Gambetta, Belfort. — Présenté par MM. Roth et Belfils.

Waguet (Philippe-Auguste), chef de travaux principal au Laboratoire central d'électricité, 148, avenue du Roule, Neuilly-sur-Seine. — Présenté par MM. Jouaust et de la Gorce.

Ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le Président se félicite de l'augmentation rapide du nombre des Membres et il exprime l'espoir qu'elle ne se ralentira plus.

Il annonce que M. le Dr Guinochet a fait à la Société un don de 30 000 francs. Il lui en exprime sa plus vive reconnaissance.

M. le Président remercie également les donateurs des ouvrages offerts dont la liste est donnée dans le présent Bulletin.

Il rappelle que depuis la séance de juillet 1927, MM. Brylinski et Routin ont été élevés à la dignité de Commandeur dans l'ordre de la Légion d'Honneur et que M. Georges Claude a reçu la Médaille de la Société de Chimie Industrielle.

La Société a été représentée aux fêtes du centenaire de Volta à

Digitized by Google

Côme, par M. Janet et au centenaire de Fresnel par MM. Fabry et Janet.

Le Délégué général rend compte des discussions très intéressantes qui ont eu lieu au cours de la semaine d'octobre. Ces discussions vont être publiées dans le Bulletin.

La plupart des questions traitées restent inscrites à l'ordre du jour des sections compétentes.

M. le Président donne la parole à M. Matignon, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France, qui expose, en la développant, la communication faite par lui à la séance de la 3e section du 19 mars 1926 sur *le glucinium* (1).

M. Matignon ajoute qu'au point de vue industriel, le prix de revient du glucinium ne peut être que très élevé, par suite de son faible poids atomique.

M. Cazaud fait remarquer que les services officiels de l'Aéronautique ne se sont pas désintéressés de la question du glucinium. Les essais effectués par M. Roekaert en vue de la préparation électrolytique du glucinium à partir de la glucine ont permis d'obtenir une quantité appréciable de métal avec un rendement assez intéressant. Il espère préparer prochainement une quantité suffisante de glucinium pour l'élaboration d'alliages Al-Gl et Mg-Gl en vue de l'étude de leurs propriétés physiques et mécaniques et en particulier de leur module d'élasticité.

M. le Président remercie M. Matignon de sa très intéressante communication, et M. Cazaud des renseignements complémentaires qu'il a bien voulu fournir.

M. Suhr, Ingénieur, chef des services électriques de la Compagnie des Produits Chimiques d'Alais, Froges et Camargue, présente une communication sur le nouvel alliage appelé « almelec ».

A la suite de cette communication, M. Henriot, Ingénieur à l'Ohio Brass, appelle l'attention sur les ruptures assez fréquentes qui se produisent sur les conducteurs fabriqués avec des métaux à point de fusion relativement bas.

Il donne certains exemples relevés en Amérique et sur lesquels M. Darrieus lui demande de fournir des précisions.

---

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, mai 1927.

Digitized by Google

M. le Président remercie M. Suhr et les membres qui ont pris part à la discussion. Il ajoute que cette discussion sera certainement reprise devant les sections compétentes.

La séance est levée à 18 heures.

ERRATA AU BULLETIN D'AOUT 1927

(*Echauffement des machines*, par Ed. Roth).

Page 845, fig. 2 *c*, lettre *c* omise au point d'intersection des flèches.

Page 857, formule 11, lire : K_r au lieu de Kr.

Page 862, 3e ligne, lire : $1{,}16 \times 10^3$ au lieu de 116×10^3.

Page 863, fig. 9, lire : $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$ au lieu de $\frac{\text{watts}}{10 - \text{cm}^2}$.

Page 863, fig. 10, lire : $\frac{\text{watts}}{1^\circ - \text{cm}^2}$ au lieu de $\frac{\text{watts}}{10 - \text{cm}^2}$.

Page 863, fig. 10, lire : G. Luke au lieu de G. Lake.

Page 869, fig. 13 *c*, l'ouverture de l'encoche est désignée par *d*.

Page 870, note, lire : $\rho_0 = \rho[1 + \alpha(0 - 0')]$ au lieu de $\rho_0 = \rho(1 + \alpha 0)$.

Page 876, formule 5, lire : sinh *nc* et cosh *nc* au lieu de sinh n_c et cosh n_c.

Page 878, formule 11, 3e terme de la 1re parenthèse, lire : $\frac{p_0 - d}{c + c'}$ au lieu de $\frac{p_0 d}{c + c'}$.

Page 878, formule 14 *b*, lire : $\frac{(1 - \gamma)\frac{c}{c + c'}}{1 + \frac{h_a p + h'_a p'}{K_r(p_0 - d)} e}$ au lieu de $\frac{(1 - \gamma) - \frac{c}{c + c'}}{1 + \frac{h_a p h'_a p'}{K_r(p_0 - d)} e}$.

Page 880, 9e ligne, lire : $3{,}93 \times 10^{-3}$ au lieu 393×10^{-3}.

Pages 887, 888, 889, 891, 894, 895, lire : K_r au lieu de K'_r; lire : s_0 au lieu de s'_0.

Page 896, formule 23 *a*, lire : K'_r au lieu de K''_r.

Page 896, formule 22 *c*, ouvrir une parenthèse après K''_r.

Page 896, 3e ligne d'en bas, lire : 0,77 au lieu de 077.

Page 936, fig. 28, lire : $m_i a \operatorname{tg}(m_i a + \varphi_i) = \nu a$; $m_i a \operatorname{tg}(m_i a - \varphi_i) = \nu' a$.

Page 938, fig. 29, lire : $u \operatorname{tg}(u + \varphi) = 2$; $u \operatorname{tg}(u - \varphi) = 1$.

Digitized by Google

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS

MESURE DES FAIBLES ANGLES DE DÉPHASAGE ET NOUVEAUX PROCÉDÉS POUR LES DÉTERMINER

Par M. J. VASSILLIÈRE-ARLHAC,

Directeur des Services Electriques aux Ateliers J. Carpentier (1)

Dans la première partie de l'exposé est décrit un nouveau wattmètre électrodynamique à miroir, permettant de mesurer à moins de 1 pour 100, les puissances pour des facteurs de puissance de l'ordre de 0,05. Cet appareil, qui peut être également monté en voltmètre ou en ampèremètre, trouve un grand nombre d'applications, entre autres dans la mesure des pertes dans les diélectriques, des pertes réelles dans les alternateurs, etc ..

L'auteur donne ensuite un nouveau procédé d'essai des transformateurs de mesure, mis au point par M Janvier, Ingénieur aux Forces Motrices du Haut Rhin, et qui a été expérimenté pendant cinq ans dans les conditions les plus diverses.

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un vibro redresseur permettant de faire des mesures très précises au moyen de galvanomètres à courant continu. Les procédés décrits permettent de faire des essais directs jusqu'à 20 000 V pour pour les transformateurs de tension et jusqu'à 2 000 A pour les transformateurs d'intensité Par la méthode indirecte, au moyen des transformateurs étalons ces essais peuvent respectivement être effectués jnsqu'à 150 000 V et 40000 A. Une construction graphique ingénieuse permet d'établir très exactement les caractéristiques du transformateur étudié et de se rendre compte immédiatement du genre de construction auquel on a à faire ; un exemple est donné pour les tranformateurs de tension.

Les mesures des très faibles facteurs de puissance sont imposées par un certain nombre d'opérations industrielles telles que : mesures des pertes diélectriques dans les câbles et les isolants, étude des condensateurs de précision, détermination des pertes dans les alternateurs, connaissance précise des transformateurs de mesure, etc...

Deux causes principales d'erreur, en dehors de celle imputable à l'étalonnage sont l'influence de la self-induction du cadre et les courants de Foucault; ces erreurs, négligeables lorsque le facteur de puis-

(1) Communication présentée à la séance du 17 avril 1926.

Digitized by Google

sance est supérieur à 0,5, deviennent très importantes lorsqu'il s'abaisse à moins de 0,1.

Dans le *wattmètre du type à pivots* des Ateliers J. Carpentier, les courants de Foucault ont été annulés en supprimant les pièces métalliques et en prévoyant des bobinages en fils divisés.

Ce wattmètre permet de mesurer à moins de 1 pour cent, les puissances pour des facteurs de puissance de l'ordre de 0,05; il peut être également utilisé pour des mesures à fréquences très élevées et pour la mesure de la puissance réactive en réalisant le montage déjà utilisé par les Ateliers J. Carpentier dans les fréquencemètres et phasemètres électrodynamiques.

Wattmètre électrodynamique à miroir. — Cet appareil, de la même firme, étudié par M. Janson, présente les avantages suivants :

Il comporte un double circuit fixe et mobile ce qui le rend astatique. La suspension unifilaire et longue, qui permet d'utiliser un fil de suspension d'une section plus grande que dans les autres types pour obtenir un même couple, assure une grande robustesse.

Pour une intensité normale dans les bobines de champ déterminée par les conditions d'essai, une déviation de 120 mm est obtenue avec un courant de 0,05 mA pour $\cos\varphi = 1$ et de 1 mA pour $\cos\varphi = 0{,}05$ dans le cadre mobile.

La consommation dans les bobines de champ est de 0,5 VA environ.

Cet électrodynamomètre peut être également monté soit en voltmètre, soit en ampèremètre. Monté en voltmètre, une différence de potentiel de 10 V aux bornes d'une résistance de 6 000 ohms donne une déviation d'environ 120 mm sur une échelle placée à 1 m. Le coefficient de variation en fonction de la température est de

$$\alpha = 1{,}6 \times 10^{-4}.$$

Une très intéressante application de cet appareil est la possibilité de le substituer au galvanomètre à vibration dans ses applications.

Ce dernier est comme nous le savons, influençable par les variations de fréquence.

Le nouvel électrodynamomètre à miroir présente sur lui l'avantage d'être indépendant de ces variations et de substituer une lecture de déviation à l'appréciation des limites d'une plage.

Si nous considérons maintenant le cas des transformateurs de mesure, le problème devient, au point de vue pratique, d'un intérêt considérable, car des transformateurs mal conditionnés peuvent en-

Digitized by Google

traîner des pertes se chiffrant dans les exploitations par des sommes très importantes.

Il est alors nécessaire de disposer d'instruments très robustes, facilement transportables et permettant d'obtenir des résultats très précis, sans que l'on soit obligé de faire appel à un personnel spécialisé, comme par exemple pour le contrôle de transformateurs de mesure dans une sous-station ou dans un poste de comptage.

Des essais dans ce but avaient déjà été faits par M. Routin au moyen de son électrogoniomètre (1).

M. Janvier, ingénieur aux Forces Motrices du Haut-Rhin, fut amené à entreprendre pour sa Société, il y a environ cinq ans, l'étude de ce problème et ce sont les résultats de ses travaux que nous allons exposer.

Nous rappellerons tout d'abord que s'il s'agit de transformateurs de potentiel, on est amené à mesurer des puissances de l'ordre de quelques dizaines de watts avec des différences de potentiel qui peuvent atteindre 100 000 V et plus.

Avec des transformateurs d'intensité, on a à effectuer des mesures de puissance de l'ordre du microwatt avec des différences de potentiel de quelques millivolts et des courants d'une fraction de milliampère.

Afin d'obtenir des mesures très précises dans des conditions d'application pratiques, M. Janvier a eu recours à la méthode directe ou potentiométrique qui permet d'obtenir le maximum d'exactitude. La précision ne dépend en effet, dans ce cas, que du degré d'exactitude et de la constance des potentiomètres utilisés, ainsi que de la sensibilité du système galvanométrique qui sert à déterminer l'équilibre.

Dans cette méthode, on oppose deux différences de potentiel prises aux bornes de résistances, s'il s'agit de mesures de tension, ou de shunts s'il s'agit de mesures de courant. Ces résistances et ces shunts, qui doivent satisfaire à un certain nombre de conditions spéciales que nous décrirons tout à l'heure, sont placés sur les circuits primaire et secondaire des appareils à étudier lorsqu'on veut déterminer les rapports de transformation.

Nous dirons tout d'abord qu'au delà de 20 000 V pour les transformateurs de tension et de 2 000 A pour ceux de courant, les mesures de comparaison directes deviennent difficiles et imprécises du fait, soit de la répartition du courant dans les shunts, soit des troubles dus à la

(1) *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, n° 33 tome IV, 2e série, année 1904.

Digitized by Google

capacité des enroulements ou aux pertes par effluves dans les résistances.

S'il est en effet possible, dans un laboratoire, de réaliser les dispositions nécessaires et très coûteuses pour éviter ces inconvénients, ce qui permet alors d'effectuer des essais à tensions élevées, à 70 000 V par exemple, ce ne l'est plus lorsqu'on se trouve obligé d'opérer dans un poste de comptage ou dans une sous-station.

Dans ce cas, il est procédé par comparaison des transformateurs à essayer à des transformateurs étalons, sans obligation pour ces derniers de présenter des caractéristiques spéciales en ce qui concerne leur rapport de transformation. On peut comparer un transformateur 5 000/110 V à un étalon de 10 000/100 V dont on connait les erreurs à la tension d'essai considérée.

L'application de cette méthode dérive de la méthode indirecte.

Il est avant tout nécessaire de disposer d'appareils permettant une mesure précise du rapport de transformation et de l'écart angulaire.

L'appareillage utilisé comporte :

1° Un système galvanométrique indicateur d'équilibre, qui comprend un vibro-redresseur et un galvanomètre à courant continu.

2° Un potentiomètre permettant la détermination du rapport de transformation et de l'écart angulaire, et un pont pour la mesure de la puissance primaire absorbée.

Les mesures au primaire, telles que M. Janvier les a prévues, permettent d'éliminer complètement les erreurs dues aux capacités parasites des isolateurs de passage, erreurs très importantes si ces isolateurs sont du type « condensateur ».

1° *Système galvanométrique.*

Le vibro-redresseur imaginé par M. Janvier est destiné, ainsi que son nom l'indique, à redresser du courant alternatif pour permettre de le mesurer. Cet appareil permet d'utiliser des galvanomètres à courant continu très sensibles; or, l'on dispose actuellement de galvanomètres à aiguille à courant continu robustes, qui permettent d'apprécier avec certitude une déviation de 5 μV.

Le vibro-redresseur (figure 1) comporte en principe un transformateur de phase et un système vibrant du type polarisé.

Le circuit primaire comprend un transformateur de phase TP, à phase variable, dont le primaire est relié aux bornes Br et dont le secondaire est polyphasé, d'une bobine de self-induction à fer variable

Digitized by Google

S, d'une résistance réglable R. Un ampèremètre A permet de régler l'intensité du courant d'excitation.

Le commutateur-inverseur I, sert à effectuer le réglage en phase (position Ph) et en quadrature (position Qa).

Le système vibrant comporte un aimant permanent dont l'une des

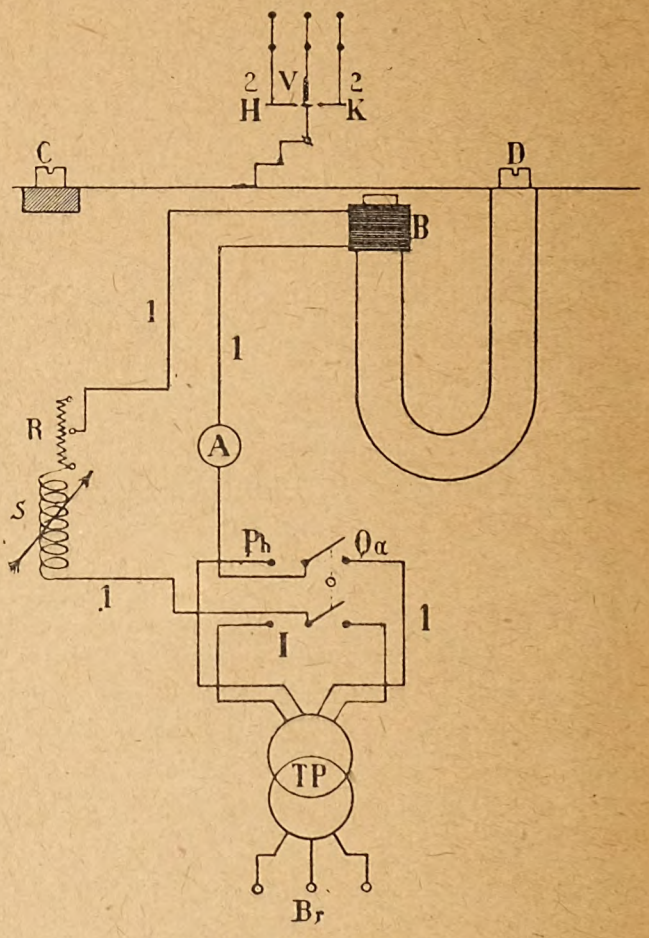


Fig. 1. — Vibro-redresseur.
1. Circuit primaire.
2. Circuit secondaire.

branches, plus courte, possède une extrémité rapportée en fer doux. Sur la branche courte est montée la bobine d'excitation B. La lame magnétique L entre en vibration lorsque la bobine d'excitation est parcourue par un courant, et transmet son mouvement au bras commutateur C, par l'intermédiaire d'une liaison élastique.

Le bras commutateur est isolé électriquement des organes du vi-

Digitized by Google

breur, et la lame L a une période de vibration propre éloignée de la période du courant alternatif excitateur, ce qui lui permet de suivre parfaitement les impulsions de ce dernier.

L'inversion du courant, réalisée en V, peut l'être avec ou sans coupure suivant le réglage des vis H et K.

La commutation avec coupure convient aux mesures de potentiel, et celle sans coupure aux mesures des très faibles intensités de courant.

Les avantages du vibro-redresseur sont les suivants :

Il est auto-synchronisant, insensible à l'influence des variations de fréquence et ne nécessite aucun dispositif d'accrochage. Il est polarisé en phase, de faible consommation : 35 VA pour le type monophasé 100 à 110 V, 80 à 100 VA pour le type polyphasé plus particulièrement désigné pour effectuer des recherches.

Les vibro-redresseurs sont peu encombrants, de poids réduit, même dans le modèle polyphasé qui comporte un déphaseur; en outre, ils ne sont pas déréglables.

Pour réaliser la variation de polarisation de l'appareil, on alimente la bobine excitatrice du vibreur au moyen d'un transformateur de phase mono ou polyphasé. Le modèle synchrone présenté permet d'effectuer les mesures pour des fréquences comprises dans les limites des fréquences industrielles jusqu'à environ 100 p : s.

Pour des fréquences supérieures, par exemple en téléphonométrie, on aurait recours au vibro-redresseur asynchrone que nous ne faisons que mentionner, et qui a fait, de la part de M. Janvier, l'objet d'une étude spéciale.

Dans le vibro-redresseur synchrone, le jeu entre les contacts fixes du bras commutant est extrêmement faible, de sorte que le redressement est aussi complet que dans les redresseurs rotatifs. Le temps de passage d'un contact à l'autre est au plus égal à 1/50 de période, soit à 1/2500 seconde à 50 p : s.

Des relevés oscillographiques, effectués sur une série d'appareils, ont pleinement confirmé ces résultats.

2° *Potentiomètres.*

L'emploi de ces appareils permet d'obtenir des mesures très précises. Nous rappelons tout d'abord qu'étant donné qu'il s'agit de rapports de grandeurs, il est seulement nécessaire, pour avoir des résultats très exacts, de réaliser une proportion très constante entre les éléments d'une même série de résistances.

Digitized by Google

Ces éléments sont évidemment constitués par un métal à coefficient de température extrêmement faible; ils sont, d'autre part, parcourus par le même courant.

Les potentiomètres de la série industrielle réalisés par les Ateliers J. Carpentier, sont réglés à 6 dix-millièmes; dans la série de précision, ils sont réglés à trois dix-millièmes. Au point de vue pratique, ceci se borne à un réglage beaucoup plus délicat et très long dans le second cas, ce qui conduit à un prix naturellement élevé, et n'est intéressant que lorsqu'on désire effectuer des recherches précises en laboratoire.

Le montage employé dans le modèle le plus courant est celui de la

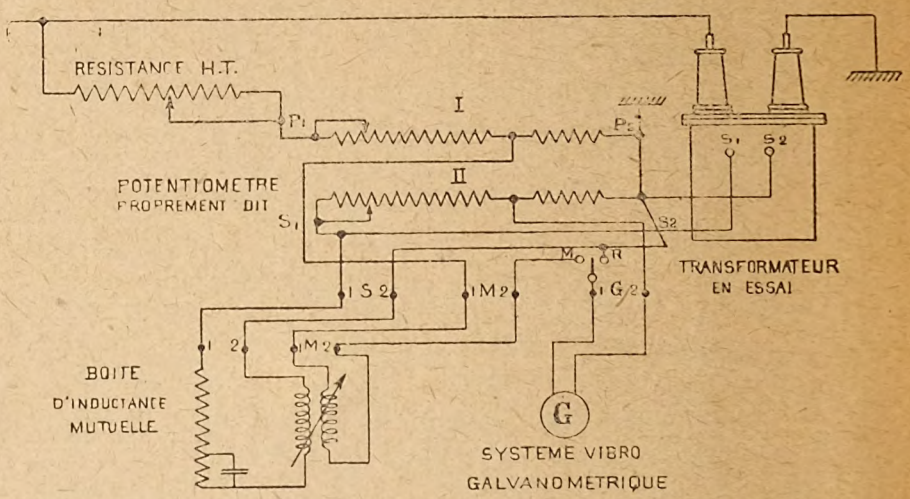


Fig. 2. — Montage pour l'essai des transformateurs de potentiel par la méthode potentiométrique.

figure 2. Les deux différences de potentiel à opposer alimentent deux résistances I et II, lesquelles sont composées d'une partie variable et d'une partie fixe. La résistance II branchée sur le secondaire est relativement forte pour que le courant soit faible et change peu les caractéristiques à vide ou en charge (la correction nécessaire peut d'ailêtre facilement apportée). Pour des considérations d'emploi en haute tension, la résistance I doit être telle que l'intensité primaire soit plus forte, afin d'éviter certaines erreurs, donc proportionnellement, plus faible.

Au moment où, en faisant varier R_1 et R_2 on a la relation :

$$r_1 \times \frac{U_1}{R_1 + r_1} = r_2 \times \frac{U_2}{R_2 + r_2}.$$

Digitized by Google

l'équilibre est obtenu, du moins en admettant que les deux tensions U_1 et U_2 sont rigoureusement en phase.

Or ce n'est pas le cas général, et l'on veut, au contraire, mesurer l'écart angulaire entre ces deux grandeurs, écart qui présente une très grosse importance ainsi que nous l'avons vu précédemment.

Deux méthodes se présentent : ou mettre les deux différences de potentiel e_1 et e_2 en phase par le jeu d'un condensateur ou d'une self-induction convenablement connectés dans l'un des circuits et déterminer l'angle par la variation de ces éléments, ou bien ajouter une différence de potentiel AB fermant le triangle OAB (figure 3).

La première méthode demande, principalement lorsque R_1 et R_2 sont

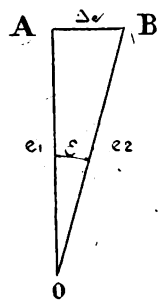


Fig. 3. — Triangle représentatif des grandeurs opposées dans les mesures potentiométriques.

faibles, et que l'angle ε est grand (1 à 2 degrés) des corrections d'après des abaques, ou de longs calculs. C'est pourquoi le second mode de *compensation* qui est d'un emploi plus général et ne demande aucune correction, a été choisi. La différence de potentiel BA, étant donné que l'angle ε est très faible, peut être considérée comme perpendiculaire à la direction OB ou OA.

Si nous alimentons avec l'une des différences de potentiel U_1 ou U_2, un circuit composé d'une résistance et du primaire d'une inductance mutuelle, le courant passant dans ce circuit sera très peu déphasé par rapport à la différence de potentiel aux bornes.

Si nous désignons par $\mathcal{L}$ la self-induction du primaire, nous savons que la présence sur une fraction r de la résistance R d'un conducteur de capacité C, peut, si la condition $Cr^2 = \mathcal{L}$ est réalisée, ramener rigoureusement en phase le courant I. Cette propriété a été utilisée. Dans ces conditions, la différence de potentiel aux bornes du secondaire est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ en avant de I, donc de V, elle est par

Digitized by Google

conséquent en phase avec la différence BA à produire; le problème est donc résolu.

Le montage général est donné par la figure 4. La grandeur de e_m et son sens sont variables par rotation du secondaire S, et la lecture faite au vernier est très précise.

En ce qui concerne uniquement l'essai des transformateurs, il n'est pas sans intérêt de remarquer que, même si une légère différence avec la quadrature était constatée, celle-ci n'entraînerait pratiquement au-

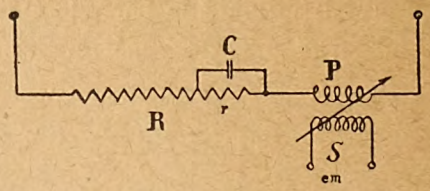


Fig. 4. — Schéma des connexions de la boîte d'inductance mutuelle fournissant la différence de potentiel $e_m = AB$.

R résistance variable.
C capacité.
P S primaire et secondaire de l'inductance mutuelle.

cune erreur appréciable sur l'angle et l'erreur sur le rapport serait exprimée par :

$$\frac{\Delta k}{k} = \sin \varepsilon . \sin \mu$$

μ étant l'angle d'erreur constaté sur e_m.

En admettant une valeur normale $\sin \varepsilon = 0{,}01$ et $\sin \mu = 0{,}01$, on arriverait donc à une erreur maxima de 0,0001, soit 0,01 pour cent. Or, les inductances mutuelles présentent au plus quelques minutes d'écart.

Au point de vue de l'exécution des mesures, le vibro-redresseur permet un réglage rapide et rationnel en raison de la polarisation de phase qu'il présente. A cet effet, on recherche, en branchant le galvanomètre sur l'une des petites résistances r au moyen de l'inverseur spécial, la position pour laquelle la déviation du galvanomètre est nulle, lorsque l'inverseur de phase du vibro-redresseur est sur quadrature. Il est plus avantageux de régler à zéro sur la position quadrature qu'au maximum sur la position phase, le premier mode étant plus précis.

On se branche ensuite entre les deux points qui doivent arriver au même potentiel et, à la position *phase* du vibro-redresseur, correspond le réglage des bras de résistance, c'est-à-dire l'ajustement du rap-

Digitized by Google

port; à la position *quadrature*, correspond le réglage de la compensation de l'angle. Deux réglages successifs s'effectuant en une minute environ suffisent pour obtenir un équilibre parfait.

Les constantes des potentiomètres sont telles que le rapport des chiffres lus sur les manettes est égal au rapport de transformation sans aucune correction.

L'écart angulaire en minutes est donné par une simple règle de trois.

Ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte d'après le principe même de la compensation, on a, en minutes :

$$\varepsilon = \frac{\sin \varepsilon \times 60}{\sin 1^0} = \frac{BA}{OA} \times 3{,}435.$$

L'erreur par effet d'ionisation ou effet coronna, limite l'emploi des résistances haute tension au delà d'une certaine tension.

Transformateurs étalons.

Au dessus de 20 000 V il est nécessaire de recourir à la méthode indirecte qui nécessite des transformateurs étalons.

Pour les très hautes tensions, on peut avoir un transformateur qu'on appellera transformateur *grand étalon* et qui servira à déterminer, par comparaison, les caractéristiques de ceux dont la tension de service est égale ou inférieure jusqu'à 30 pour cent de celle-ci. La zone d'emploi d'un tel transformateur s'étend de 30 à 100 pour cent de sa tension normale et en se limitant à 30 pour cent on se trouve dans d'excellentes conditions de fonctionnement. On peut ainsi constituer une série de 3 grands étalons par exemple :

50 000 V pour 25 000 à 50 000 V;
100 000 V pour 50 000 à 100 000 V;
200 000 V pour 100 000 à 200 000 V.

Potentiomètres pour transformateurs de courant.

Les shunts jusqu'à 10 A, sont montés à l'intérieur des appareils. Au delà de 10 A, ils sont prévus pour être disposés à l'extérieur. Ces shunts sont du type anti-inductifs, leur constante de temps est négligeable à 50 p : s; par suite de leur construction ils présentent un déphasage extrêmement faible et évalué à 1/4 de minute. Même avec des shunts de 2 V, l'influence de la capacité des 2 lames constitutives est négligeable; or, on utilise dans les essais des shunts de 1 V, au maximum.

Digitized by Google

Essais des transformateurs de tension. Construction graphique. Nomodiagrammes.

L'interprétation graphique des résultats obtenus a été faite dans les diagrammes de Möllinger. Ceux-ci ne pouvaient malheureusement, sous cette forme, rendre un compte exact du fonctionnement du transformateur aux différentes tensions et l'on ne peut cependant faire

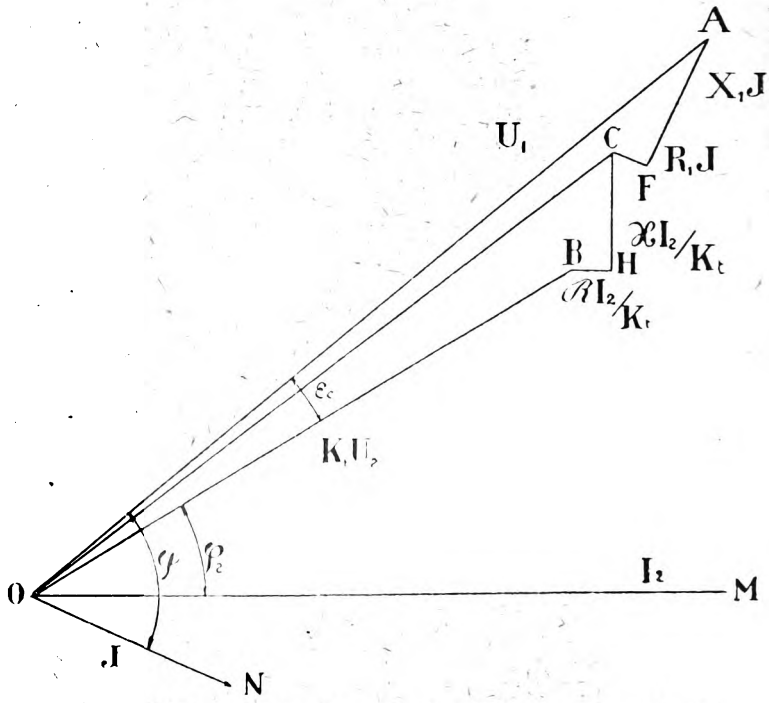


Fig. 5. — Diagramme en charge du transformateur de potentiel.

pour chaque point du fonctionnement un calcul vraiment fastidieux ou construire un nouveau diagramme.

L'auteur a été conduit à adopter la solution générale suivante, qui semble bien résoudre entièrement le problème.

Le diagramme de Möllinger traduit en somme celui de la figure 5. Etant donné que l'angle ε_c est très petit, on peut, sans grande erreur considérer que les droites OA et OB sont parallèles (figure 6).

Si nous élevons en B, une perpendiculaire BY à OB elle-même prolongée en BX, ces deux droites forment un système de coordonnées sur lesquelles on lit, d'une part, sur BX, les chutes de tension et, d'autre part, sur BY, les écarts angulaires.

Digitized by Google

On peut graduer la droite CA en ampères et décrire de C comme centre un cercle sur lequel on lira les valeurs du facteur de puissance secondaire. *Mais tout ceci n'est valable que pour une valeur bien déterminée de la tension primaire.*

Lorsque la tension change, l'échelle des coordonnées et quelques éléments changent également.

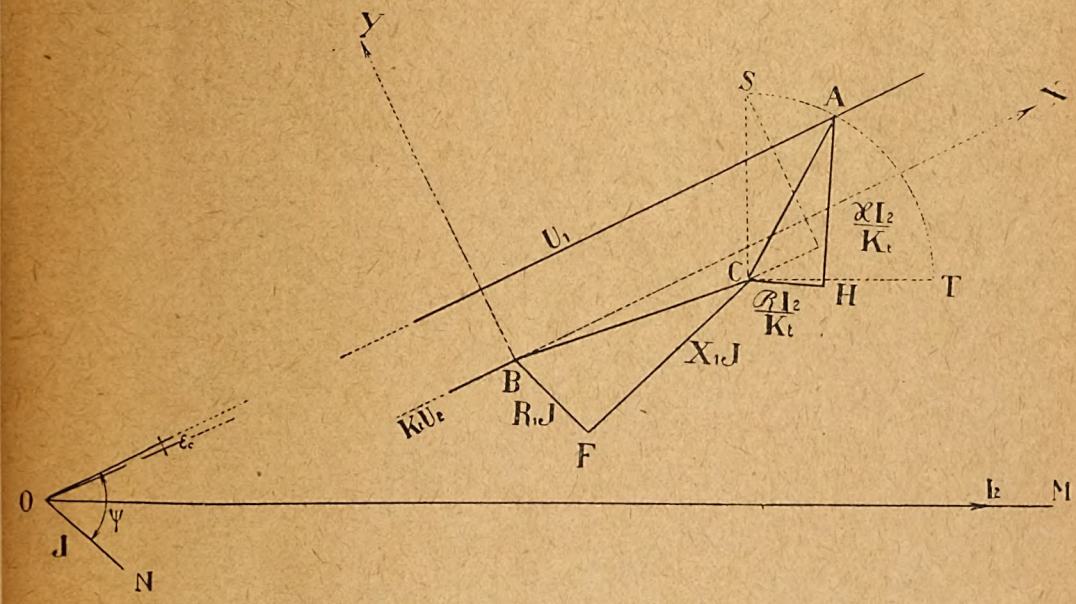


Fig. 6. — Correction du diagramme pour une tension primaire donnée.

Au lieu de porter les valeurs R_1J, X_1J, RI_2/Kt et xI_2/Kt; portons des longueurs proportionnelles au quotient de ces grandeurs par la tension de service U_1, soit :

$$\frac{R_1J}{U_1}, \quad \frac{X_1J}{U_1}, \quad \frac{RI_2}{KtU_1}, \quad \frac{xI_2}{KtU_1}.$$

Ces nouvelles valeurs sont sans dimensions et la droite $OA = U_1$ est elle-même portée à l'échelle $\frac{1}{U_1}$, c'est-à-dire que la nouvelle grandeur OA représente l'unité, *quelle que soit la valeur absolue de la tension de régime.*

Si le courant J présentait un déphasage par rapport à U_1, et lui était proportionnel, le diagramme serait unique pour toutes les valeurs de U_1. Mais il suffit de remarquer que lorsque J varie du fait de la variation de U_1, l'extrémité du triangle BFC décrit un lieu qui est la courbe polaire $\frac{ZJ}{U_1} = f(\psi)$. Cette courbe revêt la courbe d'un gamma renversé (figure 7).

Digitized by Google

Comme on peut déterminer les différentes valeurs de J et de ψ pour diverses tensions de régime, depuis les plus faibles jusqu'aux plus élevées, on peut donc facilement construire ce lieu que l'on pourra graduer lui-même en valeurs de U_1. Tout se passe comme si le point C restait fixe et que l'origine des coordonnées se déplaçait parallèlement à ce lieu.

Ceci revient à dire que, pour un régime déterminé par les valeurs U_1, I_2, cos φ_2, les caractéristiques externes sont celles à un régime dit « régime de base » U, modifiées par les corrections données par les

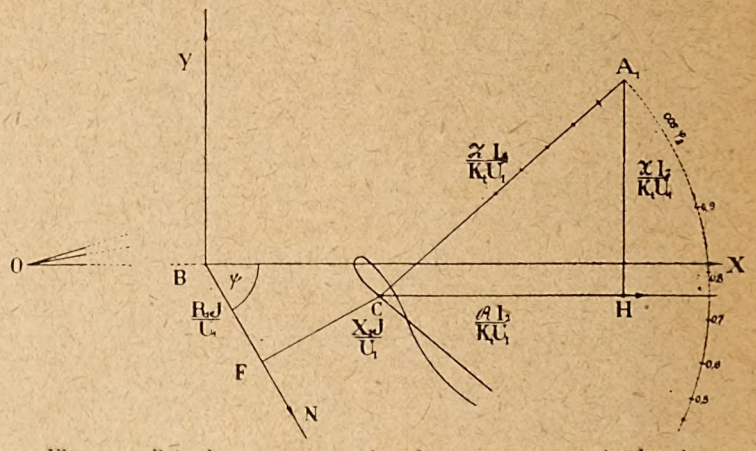


Fig. 7. — Principe et construction du monogramme intégral.

projections sur les axes de coordonnées du point correspondant au régime dans la courbe polaire $\frac{ZJ}{U_1} = f(\psi)$ et que l'on appellera également pour cette raison *courbe de correction*.

Pour plus de commodité, l'hypoténuse CA sera graduée en $\frac{I_2}{U_1}$ par un changement d'échelle convenable, au lieu d'être normalement graduée en $\frac{ZI_2}{KtU_1}$.

Exemple de diagramme (figure 8).

Soit un transformateur de potentiel 5300/110 V.

Aux essais à vide côté primaire, nous relevons les valeurs suivantes :

Tension primaire $U_1 = 5\,000$ V.

Courant magnétisant $J_0 = 15$ mA.

Avec $\cos \psi = 0{,}40$.

Résistances primaire et secondaire $R_1 = 1\,000$ ohms;

$R_2 = 600$ ohms.

Digitized by Google

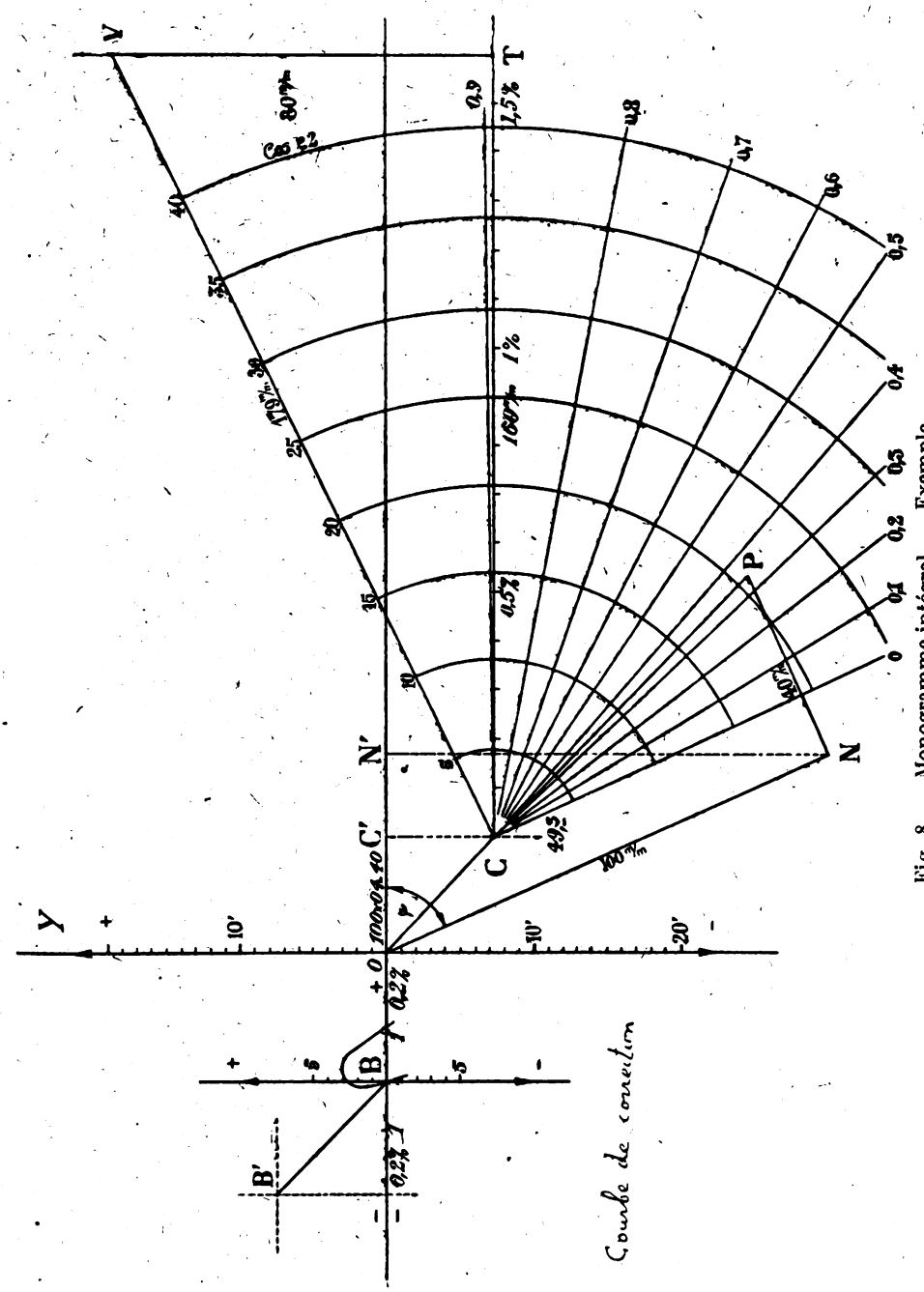


Fig. 8. — Monogramme intégral. — Exemple.

Digitized by Google

Réactance totale = 800 ohms.

Rapport de transformation à vide à la tension d'essai $K_0 = 49{,}3$.

Appliquons la construction précédemment indiquée : triangle BFC de la figure 6. Pour cela, à partir du point O, origine et suivant un angle ψ (défini par le facteur de puissance du courant magnétisant J par rapport à la tension primaire U_1), nous portons une longueur ON proportionnelle à la résistance primaire R_1, à l'échelle 1 mm pour 10 ohms par exemple, soit 100 mm pour 1 000 ohms, puis $NP = x/2$, soit 400 ohms, ce qui, à la même échelle correspond à 40 mm.

La droite OP est proportionnelle à Z_1 et mesurée, donne 107 mm d'où $Z_1 = 1\,070$ ohms.

Nous avons d'autre part $ON' = ON \cos \psi = 100 \times 0{,}40 = 40$ mm.

Nous allons construire maintenant $OC = \dfrac{Z_1 J}{U_1}$ en prenant comme échelle 100 mm = 1 pour cent [1], soit :

$$OC = \frac{1\,070 \times 0{,}015}{5\,000} = 0{,}00321 \text{ ou } 32{,}1 \text{ mm.}$$

A partir du point C, menons une parallèle à l'axe des abscisses sur laquelle nous portons une longueur proportionnelle à

$$R = R_1 + R_2 = 1\,600 \text{ ohms,}$$

soit 160 mm à l'échelle des ohms.

En T, élevons une perpendiculaire TV à la même échelle et proportionnelle à $x = 800$ ohms, soit TV = 80 mm. La direction CV est celle de $\dfrac{ZI_2}{K_1 U_1}$ de la figure 7, lorsque I_2 est en phase avec la différence de potentiel secondaire.

Nous lisons CV = 179 mm, soit Z = 1 790 ohms; on gradue généralement CV en fonction de 10^{-5}.

Pour graduer cette droite en $\dfrac{I_2}{U_1}$ posons :

$$\frac{I_2}{U_1} = l = 100 \text{ mm} = \frac{Kt}{Z} \times 0{,}01$$

or, Kt est égal au rapport de transformation à vide $K_0 = 49{,}3$ diminué de la chute de tension relative mesurée par OC'.

Nous avons OC' = 22,5 mm, soit 0,00225

et $$Kt = 49{,}3(1 - 0{,}00225) = 49{,}189;$$

---

(1) Les grandeurs $\dfrac{Z_1 J_0}{U_1}$ et $\dfrac{ZI_2}{KU_1}$ sont sans dimensions et l'on prend généralement comme échelle 1 pour 100 ou 0,01 = 5 à 10 cm suivant la précision de lecture que l'on veut obtenir.

Digitized by Google

d'où $l = 100 \text{ mm} = \frac{49{,}19}{1\,790} \times 0{,}01 = 10^{-5} \times 27{,}45,$

pour $\frac{I_2}{U_1} = 10.10^{-5}.$

Nous aurons donc $L = \frac{100 \text{ mm}}{2{,}745} = 36{,}4 \text{ mm}.$

Traçons maintenant des cercles équidistants dits « cercles de phase » avec C comme centre, ils nous permettront de lire rapidement le monogramme. Nous tracerons également les différents rayons pour les diverses valeurs en 1/10 du cos φ_2 de débit secondaire.

Les valeurs ainsi obtenues correspondent à la tension de base. il faut apporter maintenant les corrections qui sont fonction de la tension de régime et nous allons construire la courbe de correction nécessaire.

Courbe de correction.

Le monogramme a été construit pour une tension primaire de 5 000 V, par conséquent la correction à cette tension est nulle; il suffit que le point correspondant à 5 000 V, point qui par rapport à l'origine des axes a la même position que le point C, passe par l'origine du nouveau système d'axes choisi.

On prend pour la courbe de correction les mêmes échelles que pour le monogramme, et on la construit généralement à gauche du système de coordonnées initial; cette courbe traduit simplement l'équation

$$\frac{Z_1 J_0}{U_1} = f,$$

en coordonnées polaires, U_1 étant la variable principale.

Si l'on prend le point B comme origine des axes de correction, on choisira comme origine des axes de construction un point B′, tel que BB′ égale et parallèle à CO, puis, pour chaque point qui a été déterminé ou dont on a les caractéristiques, on fait le produit $\frac{Z_1 J_0}{U_1}$, et on le porte suivant un angle ψ en partant du point B′. La courbe obtenue est graduée en tension primaire et il suffit de lire à l'échelle du monogramme les corrections à effectuer.

En ce qui concerne les écarts angulaires, ils sont donnés sur l'axe OY, par le sinus des angles correspondant lu à l'échelle des nombres.

Nous avons choisi une longueur $l = 1$ pour cent $= 0{,}01$. Dans

Digitized by Google

ces conditions, un angle de 1° correspond à une longueur :

$$L = \frac{l \times 0.01746}{0,01} = l \times 1,746$$

(on a sinus 1° = 0,01746), autrement dit, pour 10 minutes d'arc on aura une longueur $\lambda.10$ minutes $= l \times 0,291$.

La figure 8 représente un dè ces diagrammes-abaques qui traduisent bien et entièrement la loi du transformateur et auxquels l'auteur a donné le nom de *monodiagrammes intégraux*, des transformateurs de tension étudiés.

Le système de représentation est utile pour plusieurs raisons :

1° Il permet de constituer, par une seule feuille, le dossier du transformateur.

2° Il rend bien et rapidement compte des conditions générales de fonctionnement aux différentes tensions.

3° Au point de vue de l'utilisation des transformateurs comme appareils de précision, il est extrêmement précieux, car il indique nettement les limites entre lesquelles le transformateur peut être considéré comme présentant une grande constance.

4° Enfin, la courbe de correction *permet presque à elle seule de déceler les défauts de fabrication.*

Modification du monodiagramme ***par l'addition de résistances*** *de protection au primaire du transformateur.*

Dans ce cas, le monodiagramme présente une modification d'orientation des arcs de la courbe de correction, ainsi qu'un changement d'échelle des valeurs I_2IVI, puisque la valeur Z est modifiée.

L'angle δ_c est égal à δ et l'échelle de la courbe de correction est diminuée dans le rapport de l'ancienne impédance primaire à la nouvelle.

On remarque de suite, comme le montre la pratique, que l'adjonction de résistances primaires oriente l'angle d'erreur vers les valeurs négatives (avance du secondaire) sur le primaire et que la puissance de précision est diminuée.

Dans le cas des transformateurs d'intensité, l'auteur a recours également à une construction graphique basée sur le diagramme général de ce genre de transformateurs.

Cette construction et les résultats qu'elle permet d'obtenir feront l'objet d'un exposé ultérieur.

Digitized by Google

Résumé.

La mesure des puissances avec facteurs de puissance de l'ordre de 0,05 est facilement réalisable au moyen du nouvel électrodynamomètre construit par la Société des Ateliers J. Carpentier.

Les essais de transformateurs de mesure sont rendus possibles de façon très pratique et rapide au moyen de l'appareillage réalisé par M. Janvier et qui permet d'effectuer des mesures de faible puissance et de faible intensité en courant alternatif, avec un galvanomètre très sensible à courant continu en utilisant un vibro-redresseur synchrone présentant de nombreux avantages sur les différents types réalisés jusqu'ici.

Des constructions graphiques permettent de se rendre compte des caractéristiques du transformateur étudié et indiquent si l'appareil convient au but proposé.

L'application pratique est faite pour un transformateur de potentiel.

Digitized by Google

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE DANS L'INDUSTRIE EN DEHORS DES LABORATOIRES

par M. Maurice Leblanc,

Directeur technique de la Société Anonyme Hewittic (1).

J'ai depuis longtemps pensé qu'on pourrait, mais seulement à des intervalles éloignés, car cette tribune doit rester avant tout très technique, aborder ici avec fruit un sujet d'ordre général susceptible d'intéresser tous les électriciens et que, sur un sujet de cet ordre, une discussion pourrait s'engager beaucoup plus facilement que sur un sujet technique, n'embrassant qu'un champ limité, pour lequel des spécialistes peuvent seuls intervenir utilement.

M. Grosselin et le Bureau de notre Société ont bien voulu faire bon accueil à ma suggestion et me charger de l'organisation de la séance de ce soir.

Le sujet que je leur ai proposé, *La recherche scientifique dans l'industrie en dehors des laboratoires*, est un de ceux sur lequel tout ingénieur ou tout administrateur qui a été mêlé pendant quelques années à la vie d'une de nos sociétés de construction ou de production a eu l'occasion de réfléchir. Néanmoins, connaissant la réserve avec laquelle les techniciens français interviennent dans un débat s'ils ne s'y sont pas spécialement préparés, j'ai cru prudent de demander à quelques personnes des plus qualifiées pour traiter un tel sujet, de bien vouloir venir prendre la parole ce soir, en réservant à chacune d'elles la partie du sujet sur laquelle ses occupations habituelles l'ont mise à même d'être particulièrement bien renseignée. J'ai eu la bonne fortune de recevoir de tous ceux que j'avais sollicités, une réponse favorable et je les en remercie vivement.

Mon rôle s'en trouvera très simplifié et je me bornerai à un exposé général mais succinct, de manière à leur céder la parole le plus tôt

---

(1) Communication présentée à la séance du 6 juillet 1927 de la Société française des électriciens.

Digitized by Google

possible. Il est bien entendu que tous ceux qui voudront ensuite prendre la parole pour élargir ce débat seront les bienvenus.

Les laboratoires de science pure où l'on peut travailler sans souci de l'application prochaine, prendre le temps de traiter complètement une question, d'en étudier tous les détails et d'en tirer toutes les conséquences, construire et vérifier des théories groupant les faits tirés de l'expérience, rendent à l'industrie d'inappréciables services en défrichant devant elle, et souvent à grande distance, la route vers le progrès.

Comme le disait si justement M. Fabry dans une occasion récente : « sans science, il ne serait pas de science appliquée ». Nous leur devons donc une grande reconnaissance et notre intérêt le mieux compris est de contribuer, dans la mesure de nos moyens, à leur développement.

Mais la recherche scientifique n'est pas localisée dans ces laboratoires. Dans notre industrie électrique en particulier, bien rares sont les établissements industriels, même privés de laboratoires organisés, qui n'ont pas eu l'occasion de s'y adonner et bien souvent sans s'en douter.

Nous souhaitons que la discussion qui va s'ouvrir montre combien la généralisation de cet effort de recherche pourrait avoir une influence favorable sur notre prospérité industrielle.

Les buts primordiaux de l'industriel, l'amélioration de la qualité de la fabrication et la diminution du prix de revient ne peuvent être atteints que par un ensemble d'efforts simultanés : travail du Bureau d'études, recherche de matières premières de meilleure qualité, compression de leur prix d'achat, diminution de la main-d'œuvre, perfectionnement de l'outillage, etc..... mais ils nécessitent presque toujours aussi une série d'expériences systématiquement conduites qui, à un degré plus ou moins élevé, sont un exemple de recherche scientifique.

Cet effort constant vers le progrès s'impose dans les entreprises en pleine prospérité aussi bien que dans celles qui traversent une situation difficile, car les royautés industrielles sont passagères et ceux qui s'endorment ne savent jamais quel réveil leurs concurrents leur réservent. Le marché si disputé des Etats-Unis nous en est un exemple constant ; l'on y voit l'engoûment du public, passer rapidement d'un article à un autre sur lequel un nouveau perfectionnement vient d'attirer l'attention. La T. S. F. y avait fait un tort considérable à la grande vogue du phonographe, mais celui-ci a réalisé récemment des

Digitized by Google

progrès remarquables et actuellement l'industrie radiotélégraphique recule devant lui. N'y voyons-nous pas la production automobile de Chevrolet atteindre aujourd'hui deux fois celle de Ford, parce que celui-ci n'a pu compenser par la puissance de ses moyens de production et de vente, l'erreur de rester attaché à un modèle immuablement fixé depuis plus de quinze ans.

Pour assurer ou développer sa prospérité, il faut sans cesse perfectionner, rester stationnaire c'est céder du terrain.

Notre pays ne possède, pour la production en grande série, que des moyens souvent inférieurs à ceux d'autres grandes nations, il est essentiel que sa production se distingue en revanche par l'excellence de sa qualité si nous ne voulons pas être écrasés dans la bataille économique qui se livre dans le monde et ne peut que s'intensifier, d'où la nécessité, pour nous, d'un travail continu de perfectionnement. Et il importe que cet effort soit personnel. Les résultats ne peuvent en être transmis à d'autres que d'une manière fragmentaire, l'expérience qui s'achète ne conduit qu'à une fabrication toujours en retard sur celle qui la guide, et si elle est de provenance étrangère, à une production souvent mal adaptée aux besoins nationaux.

D'ailleurs, au cours de ces essais qui n'ont d'abord d'autre but que l'amélioration d'appareils déjà existants, fréquemment de nouvelles idées écloront, permettant la création de nouvelles fabrications.

Ne peut-on citer ici en exemple la magnifique moisson, qu'ont rapportée à la General Electric C° les études entreprises d'abord en vue du perfectionnement de la fabrication de la lampe à incandescence? En plus des avantages économiques qu'elles procurent, ces recherches sont une excellente école pour les jeunes ingénieurs: elles permettent de mettre à l'épreuve leurs qualités d'initiative et d'imagination, d'effectuer parmi eux une sélection sur des bases sérieuses. Enfin elles ont une heureuse influence sur l'état moral du personnel tout entier, fier d'appartenir à une société qui se signale par son esprit de progrès et d'initiative, et elles aident à former cet « esprit de la maison » qu'il est si nécessaire de développer pour assurer la puissance d'une entreprise industrielle.

Il est nécessaire que ce travail de recherches soit sérieusement organisé et surveillé, si l'on ne veut pas qu'il soit simplement une cause de dépenses sans résultat utile. Il doit, tout d'abord, être effectué en dehors de la fabrication normale; en effet, produire à bon marché et dans des délais raisonnables, exige le minimum de changements dès que la fabrication a été mise en route. Il faut en outre, autant que

Digitized by Google

possible, qu'il soit exécuté dans des locaux séparés des ateliers et par un personnel spécial, il ne doit pas distraire ceux dont l'activité est entièrement consacrée à un travail de production. Le choix de ce personnel spécial est difficile. L'expérience a montré que les inventeurs appartiennent à toutes les formations intellectuelles et que souvent les gens les moins instruits ont le plus d'imagination. Mais, outre qu'il ne s'agit pas ici à proprement parler d'invention, mais de recherche méthodique, une imagination très vive qui ne s'appuie pas sur une instruction sérieuse et un esprit critique sûr, n'aboutit généralement qu'à des résultats stériles. Il faut ici un ingénieur qui allie à une instruction scientifique solide, une habitude suffisante des méthodes du laboratoire, comme le font, par exemple, les meilleurs élèves de l'Ecole de Physique et Chimie de la ville de Paris.

Le rôle du directeur technique est multiple, il doit indiquer ou suggérer les sujets de recherches, limiter celles-ci pour éviter qu'elles ne s'étendent à des questions dont l'intérêt scientifique est peut-être certain, mais dont l'intérêt pratique n'apparaît pas pour un jour prochain, les développer au contraire s'il le juge nécessaire pour une compréhension plus complète de la question ou parce qu'elles semblent réserver des promesses d'avenir, prévenir les découragements, réveiller les énergies fatiguées par un long insuccès, avoir le courage, sans égard aux sommes d'argent déjà dépensées, d'arrêter les recherches qui s'éternisent sans résultat, s'assurer la confiance de son personnel qui lui doit un compte fidèle des résultats obtenus, le guider, tout en lui laissant l'impression qu'il a une initiative entière, sentiment indispensable au chercheur. Il doit faire affluer vers ce dernier toute la documentation qui peut faciliter sa tâche, livres, articles de revue, lui procurer les conseils nécessaires. Rôle complexe et délicat.

Est-il certaines méthodes particulièrement fécondes?

On doit naturellement s'efforcer d'appliquer celles qui ont reçu leur consécration dans les laboratoires scientifiques. Mais souvent on doit aussi avoir recours à d'autres qui n'offrent pas cette garantie.

Le cas se présente par exemple lorsqu'on aborde des phénomènes dont on n'a pas la pleine compréhension, je citerai pour rester dans des domaines qui me sont familiers, la fabrication des piles sèches du type Leclanché, où l'on utilise des matières premières mal définies dont certaines impuretés jouent probablement un rôle important mais inconnu, en agissant comme catalyseurs, ou celle des tubes à vide où,

Digitized by Google

dès que les ions entrent en jeu, les phénomènes sont si complexes qu'on ne peut les suivre ; on est alors conduit à faire varier empiriquement un des facteurs déterminants du phénomène et à constater les résultats produits sans que l'on puisse s'expliquer le mécanisme qui lie la cause à l'effet. Pour se mettre à l'abri d'une variation inconnue d'un autre facteur, il est indispensable d'exécuter en même temps, à titre de contrôle, des essais dans lesquels celui dont on étudie l'action demeure inchangé.

S'agit-il d'essais destinés à éprouver la façon dont se comportera à l'usage un certain appareil ? On sait combien il est toujours difficile de réaliser à l'usine les conditions exactes d'utilisation et qu'il est presque impossible d'empêcher les expérimentateurs de donner, à l'appareil défaillant, des retouches qu'ils jugent insignifiantes mais qui suffisent cependant à prévenir sa mise hors service.

Mais quelquefois il n'est pas possible de réaliser à l'usine les conditions de la pratique et on doit se résoudre à juger de la valeur d'un perfectionnement par les résultats qu'il donne à l'usage chez le client. Pour suivre ceux-ci, on doit procéder par établissement et analyse de résultats statistiques dont l'interprétation, avec élimination des cas douteux ou extrêmes, demande une large intelligence et une compréhension entière du sujet. Je n'insisterai pas davantage sur ce point, mais j'attirerai, en passant, l'attention sur une des difficultés des essais industriels, due à ce qu'ils sont souvent exécutés avec des instruments de mesure insuffisants. Aussi est-il toujours indispensable de faire spécifier avec quels instruments le résultat a été obtenu et s'il est important de les faire contrôler. On se met évidemment à l'abri de ce souci si on peut réaliser une organisation comme celle des ateliers Brown Boveri où plusieurs centaines d'instruments d'excellente qualité repassent systématiquement et fréquemment au laboratoire d'étalonnage.

Certaines précautions doivent être enfin prises pour tirer parti du travail effectué et des dépenses encourues. En effet, trop souvent il n'en reste aucune trace.

Combien de fois les mêmes expériences ne se sont-elles pas recommencées, parce que l'on a négligé d'enregistrer les résultats de façon suffisamment sérieuse.

Il faut obliger l'expérimentateur à rédiger un rapport complet des essais avec schémas et dessins, même si plusieurs jours sont nécessaires pour ce travail.

Digitized by Google

Cette rédaction a d'ailleurs l'avantage de faire préciser des points qui sinon resteraient insuffisamment éclaircis.

Ce rapport est remis à la Direction technique qui en donne communication partielle ou totale aux différents services intéressés et le fait ensuite classer en plusieurs exemplaires.

Les méthodes de classement peuvent varier à l'infini et il est difficile de dire rien de général à leur sujet, si ce n'est cependant d'insister sur le soin avec lequel, une fois choisies, elles doivent être respectées.

La direction doit posséder une profonde expérience quand il s'agit de déterminer dans quelle mesure et dans quel délai les perfectionnements doivent être introduits dans la fabrication normale. S'il est désastreux qu'une production reste immuablement fixée sur certains modèles, il peut être en revanche, dangereux qu'elle soit livrée sans frein, sans souci des contingences commerciales ou financières, à l'initiative des techniciens. Ceux-ci, jamais satisfaits de leur œuvre, sans cesse à la poursuite d'un idéal qui ne peut être atteint que par degrés, n'ont souvent pas la sagesse de s'arrêter pour tirer profit des résultats déjà acquis, et se contenter d'un produit, certes encore éloigné de la perfection, mais déjà cependant susceptible d'une fructueuse exploitation commerciale.

En terminant, je m'excuserai, Messieurs, de la sécheresse de cet exposé où je me suis maintenu volontairement dans des généralités qui ont dû vous faire souvent l'effet de lieux communs, laissant à ceux qui vont parler après moi le soin de les illustrer par des exemples.

Digitized by Google

LES DIFFÉRENCES ESSENTIELLES ENTRE LES MÉTHODES DES LABORATOIRES DE SCIENCE PURE ET CELLES QUE L'ON PEUT APPLIQUER DANS L'INDUSTRIE

par M.-E. Darmois

Professeur de physique à la Sorbonne (1).

Le titre de cette communication semblerait indiquer qu'il y a effectivement des différences importantes entre les méthodes en question ; il n'en est rien et si ces différences existent, elles sont plutôt de détail que de principe. Deux points principaux sont la cause de ces différences : 1° le choix des problèmes traités ; 2° le temps accordé pour les traiter.

Dans les recherches de science pure, le choix est libre. Comment se décide, par exemple, le chercheur qui prépare une thèse de doctorat ? Il arrive quelquefois au laboratoire avec des idées personnelles ; quelquefois c'est le directeur du laboratoire qui lui indique un sujet faisant partie d'un ensemble, souvent le chercheur prend une question à la mode. En tout cas, si le sujet se complique, on le tourne, cherchant la moindre résistance et le travail qui *rend*. Dans ces conditions, les exemples sont fréquents d'une déviation sérieuse ou d'une limitation. Je citerai, par exemple, le cas d'un de nos élèves qui arrive avec l'intention de mesurer le pouvoir inducteur spécifique de l'eau et des solutions salines, sujet à la mode ; il fallait monter pour cela un système producteur d'ondes entretenues et propagées le long de deux fils métalliques parallèles, déterminer la longueur d'onde dans l'air, puis dans la solution. On s'aperçut, chemin faisant, que la propagation dans l'air n'avait jamais été bien étudiée et ce fut là le sujet de la thèse. Dans l'industrie, le choix est la plupart du temps limité, le problème s'impose : il s'agira, par exemple, de défauts de fabrication apparaissant brus-

(1) Communication présentée à la séance du 6 juillet 1927 de la Société française des électriciens

Digitized by Google

quement ou de la reproduction de résultats obtenus par une industrie concurrente, etc...

Quel temps mettra-t-on à faire le travail? Dans les recherches de science pure, il y a quelquefois intérêt à aller un peu plus vite, pour devancer la publication par un autre, c'est précisément le cas des sujets à la mode, comme l'est actuellement par exemple la spectroscopie en général. Si, au contraire, le sujet est classique, comme une nouvelle détermination d'une constante importante, on a tout le temps et les exemples sont fréquents de thèses dont la préparation dure de 5 à 6 ans. En règle générale, on ne sera donc pas pressé ; même dans le cas de concurrence, on sait que les deux chercheurs ne verront pas le sujet de la même façon. Dans l'industrie, au contraire, *on n'a pas le temps d'attendre* et c'est la caractéristique la plus nette de la science appliquée ; il faudra aller au but aussi vite que possible. Et voilà les différences fondamentales spécifiées, le reste n'étant plus que détail.

A. — *Méthode scientifique.* — La méthode scientifique est unique, on l'applique consciemment ou inconsciemment. Bacon a formulé ses règles (qu'il appliqua d'ailleurs assez mal). C'est la combinaison de l'expérience et de la théorie, celle-ci précédant celle-là, s'adaptant à elle au fur et à mesure des recherches. Sans la théorie, l'expérience est impuissante ; c'est l'expérience, en revanche, qui indiquera dans quel sens il faut pousser la théorie. Si le choix des problèmes est presque imposé dans l'industrie, leur « définition » est souvent difficile, en ce sens qu'il faut poser correctement un problème pour chercher la solution. Prenons l'exemple suivant : un fabricant d'accumulateurs pour automobiles, découvre que, au bout d'un an, ses éléments lui reviennent avec des positives en miettes, n'ayant duré que moitié du temps escompté. Pourquoi? Il doit d'abord s'assurer que la statistique est bien faite et que le défaut en question a bien lieu dans la plupart des cas et chez tous les clients. Si oui, le nombre des facteurs du problème est considérable : Composition du métal des positives, fabrication de l'alliage, coulée, moulage, composition et application des pâtes, nature des séparateurs, montage etc... et enfin traitement chez le client. C'est à ce moment que la méthode scientifique doit intervenir, pour limiter le nombre des variables et cette méthode doit être maniée par un directeur des recherches à connaissances générales étendues, ici physicien et

Digitized by Google

chimiste. Tout le monde est à peu près d'accord pour reconnaître que si les connaissances techniques sont utiles pour continuer la surveillance d'une fabrication, les connaissances générales sont indispensables pour faire un travail de recherches dans l'industrie.

B. — *Personnel. — Instruments.* — Supposons le problème localisé et un programme de recherches établi. Qui fera les expériences ? Dans les thèses de doctorat, c'est le même qui fait tout : projets, expériences, lectures d'appareils, etc... et l'on sait quel travail matériel considérable exige la moindre publication. Dans l'industrie, le travail matériel pourra être mieux réparti ; si une même opération se répète un grand nombre de fois, on pourra dresser un personnel auxiliaire de recherche, qui n'a pas besoin de savoir le but général poursuivi. Il y aura aussi avantage à employer le plus possible d'instruments automatiques, enregistreurs, etc... En somme, on utilisera au maximum la valeur intellectuelle du personnel. L'énergie cérébrale est d'une essence si rare et si coûteuse, qu'il faut l'employer avec le maximum de rendement. L'homme ne doit effectuer que ce qui est jugement, choix, décision à prendre. Et ce principe s'applique à tout le personnel. A ce point de vue d'ailleurs, les laboratoires de science pure sont forcés, pour accroître leur production, de se mettre dans le mouvement ; c'est ce qui explique l'apparition de nombreux appareils inscripteurs.

C. — *Précision des recherches.* — La précision doit être celle qui est juste nécessaire ; il est inutile que la précision des mesures dépasse la précision de reproduction d'une même expérience. C'est dire que la précision variera d'une industrie à l'autre. On dit souvent que la science pure fait des mesures exactes, la science appliquée, des mesures approchées. Ce n'est pas vrai partout ; certaines industries mécaniques travaillent maintenant au 1/100 de millimètre et les mesures électriques industrielles deviennent dans certaines industries de vraies mesures de précision. Ce qu'on peut dire, c'est qu'en science appliquée, il faut faire vite. Par exemple, une série d'expériences donne un tableau de nombres qui représente la correspondance entre deux variables ; le physicien pur cherchera la formule exacte qui relie les deux variables au degré d'approximation des expériences ; le chercheur industriel prendra une formule empirique ; cette dernière sera quelquefois préférable à la formule exacte, trop compliquée.

Ce qui est vrai pour les formules est vrai aussi pour l'explication et la coordination des faits. La théorie exacte peut être trop compli-

Digitized by Google

quée ; on lui substituera, en science appliquée, une théorie approchée, hypothèse de travail, d'où on déduira des propriétés approchées, à *un pourcentage connu*. C'est le cas pour l'utilisation des courants sinusoïdaux en électrotechnique. Le scientifique pur trouvera quelquefois cette façon d'agir inacceptable et préférera chercher une précision limite. Il est connu, par des exemples célèbres, que les découvertes n'ont pas toujours résulté de mesures exactes à la 4e décimale ; l'essentiel sera de savoir quelle précision sera utile. En d'autres termes, la recherche en sciences appliquées sera simplifiée autant qu'il sera possible pour les besoins pratiques. Quelquefois ces besoins seront tels qu'il faudra une précision analogue à celle des mesures les plus soignées ; certaines industries, utilisant des températures élevées, ont besoin de cette précision ; nous avons déjà dit que c'est le cas aussi de certaines mesures électriques. Dans ces cas, il n'y a vraiment plus aucune différence entre les deux genres de recherches et la science appliquée tend vers la science pure, puisque ces méthodes qui sont déjà les mêmes en principe, ont ici la même rigueur.

Le choix de ces méthodes, celui de la précision à atteindre, sera du ressort du directeur des recherches, d'où, à nouveau, l'importance des connaissances générales. Je suis d'avis, d'ailleurs, que les principes d'organisation, indispensables dans l'industrie pour réussir vite et bien, seraient également très utiles dans les laboratoires de science pure où ils permettraient d'accroître le nombre des travaux publiés. Il n'y a pas de règle pour faire des découvertes, l'esprit souffle où il veut ; ceci admis, tout le côté matériel des recherches, et il est considérable, est uniquement affaire d'organisation.

Digitized by Google

LE TRAVAIL DE RECHERCHES DANS LES SOCIÉTÉS DE PRODUCTION ET DE DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ

Par M. Imbs.

Directeur général de la C.P.D.E. (1)

Pour caractériser le travail des recherches dans les Sociétés de Production et de Distribution, M. Imbs donne une trentaine d'exemples des inventions et perfectionnements apportés par des Ingénieurs des différents secteurs de la région parisienne (C.P.D.E., Union d'Electricité, Ouest-Lumière, Nord-Lumière, Est-Lumière, Société d'Electricité de Paris, etc...).

Il cite notamment les inventions ou perfectionnements suivants : appareils de MM. Bonfante, Dupuis, Durif, Deschamps, Jumier, Masson, Maurer, O'Keenan, Roussel, Tinnel, Veillet; sablage des chaudières de la S.E.P.; procédé de déchargement hydraulique des charbons de M. Postweiler; enlèvement hydraulique des cendres et mâchefers de M. Pécheur; relais et autres appareils de l'Ouest-Lumière, relais de la S.E.P.; interrupteur balistique de M. Pécheur; études remarquables sur les surtensions de M. Fallou et cinémographe du même auteur.

Puis M. Imbs ajoute :

Ces exemples, et il y en aurait bien d'autres venant de province, montrent qu'en dehors du laboratoire, de nombreuses et importantes améliorations ont été apportées dans les Compagnies de Production et de Distribution par le personnel exploitant.

Ces inventions ou perfectionnements ont permis, dans certains cas, de réaliser des économies très importantes, et en tous cas d'améliorer les conditions d'exploitation.

Les constatations faites au cours de l'exploitation d'un réseau ou d'une centrale, posent des problèmes d'ordre pratique qui ne seraient pas soulevés en laboratoire et qui, souvent, reçoivent leur solution du

(1) Résumé d'une communication présentée à la séance du 6 juillet 1927 de la Société française des électriciens.

Digitized by Google

personnel exploitant lui-même, plus facilement que d'un personnel étranger à l'exploitation.

Il est certain que les réseaux des grandes et même des petites Sociétés constituent un vaste champ de constatations, d'expériences, en quelque sorte un laboratoire animé.

Les exemples donnés montrent que ce sont presque toujours les mêmes personnalités qui sont les auteurs des recherches et des perfectionnements. C'est qu'en effet, la valeur des recherches dépend de la qualité de l'homme au point de vue inventif et également au point de vue des méthodes d'investigation et de contrôle. Il faut que les essais effectués sur un réseau, le soient par des hommes compétents, appliquant les méthodes de l'investigation scientifique avec les procédés de mesure et d'observation modernes (enregistrements oscillographiques, par exemple) de façon à bien pénétrer la nature des phénomènes et à parer aux causes d'incidents.

Il faut également que soient mises à la disposition de ces hommes des installations de laboratoire convenables.

Les économies signalées plus haut font ressortir l'intérêt que les Sociétés de Production et de Distribution ont à s'engager de plus en plus dans cette voie.

Il n'y a d'ailleurs que des avantages à ce que les recherches ne soient pas centralisées, mais restent quelque peu dispersées, de façon à permettre de déceler les éléments capables dans chaque organisme.

Dans certains cas, les recherches faites par les secteurs ont eu un intérêt qui dépasse le cadre de la Société où ils ont été effectués, ils ont même pu conduire à des modifications dans la construction du matériel (exemple de M. Fallou, dont les expériences ont fourni des données précieuses sur les contraintes auxquelles sont soumis les enroulements des transformateurs) : ces essais peuvent déterminer des progrès dans l'industrie électrique et dans la science en général.

Tout ceci démontre que les réseaux sont des laboratoires animés où des éléments capables doivent être appelés et mis à même d'utiliser le réseau comme champ de recherches scientifiques.

Mais tous ces efforts doivent finalement s'appuyer sur notre grand Laboratoire Central d'Electricité qui est — comme on l'a vu récemment par les essais des disjoncteurs à la centrale de Saint-Ouen de la C.P.D.E. — l'élément indépendant qui assure à tous la méthode sûre et le contrôle parfait des investigations avant tout. Organisme

Digitized by Google

d'étalonnement, il est également désigné pour donner des conseils éclairés sur les méthodes de mesures des autres laboratoires.

Dans les réseaux comme chez les constructeurs, on devra donc continuer à créer des laboratoires isolés, mais il faut, à côté de ces efforts éparpillés, un grand laboratoire central par nature d'industrie. Le Laboratoire Central d'Electricité est ce grand laboratoire pour les recherches électriques : il faudra le compléter dans la plus large mesure possible et lui permettre de devenir en même temps que le grand laboratoire de contrôle, le grand laboratoire des recherches d'ordre général en matière électrique.

N'oublions pas que, dans la grande division tripartite des efforts humains : Capital, Intelligence et Travail, le laboratoire représente au plus haut degré l'élément Intelligence, sans lequel le Capital et le Travail demeurent infructueux.

Digitized by Google

LE TRAVAIL DE RECHERCHES DANS LES SOCIÉTÉS FRANÇAISES DE CONSTRUCTION

par M. GRATZMULLER (1).

J'ai accepté, non sans quelque hésitation, causée par le nombre de documents à recueillir, d'intervenir dans la discussion soulevée par mon beau-frère M. M. LEBLANC. La question dont j'ai signalé l'importance pour l'industrie française, dans ma communication à la Société, le 2 juin 1920 (2), m'est cependant assez chère pour que j'aie tenté d'en donner une impression d'ensemble.

Voici les points que je développerai :

1° Généralités.

2° Résultats acquis.

3° Revue des moyens d'expérimentation actuellement à la disposition de l'industrie électrique en France.

I. — GÉNÉRALITÉS.

Les plus grands mathématiciens et, parmi nos célébrités les plus récentes POINCARÉ, PICARD, HADAMARD, n'ont pas hésité à affirmer que l'origine de l'invention mathématique est dans l'observation et l'expérience.

L'expérience, ou observation provoquée, suivant la profonde définition de Claude BERNARD est surtout indispensable dans l'étude des sciences de la nature, mais, quelque fût le degré d'abstraction de leurs recherches, les plus grands imaginatifs se sont soumis à son contrôle et y ont puisé les intuitions nécessaires.

Mais la technique est un art où, tout en s'appuyant sur les lois scientifiques, on est souvent fort embarrassé pour les appliquer aux cas concrets, *si toutefois ces lois existent*.

Je m'explique : le nombre des paramètres est souvent très grand et l'on ne sait pas toujours résoudre, ni même poser, les équations, différentielles ou non, auxquelles doivent satisfaire les inconnues.

---

(1) Communication présentée à la séance mensuelle du 6 juillet 1927.

(2) La technique française et l'électrification des chemins de fer, *Bulletin de la Société française des Electriciens*, T. X, 3e série.

Digitized by Google

Cette difficulté conduit donc souvent à baser une théorie sur des hypothèses simplificatrices.

Telle, par exemple, en électro-mécanique, l'assimilation d'une chute de tension à une chute ohmique, ou celle d'un flux d'induction à une grandeur proportionnelle au courant, assimilation qui mène à des équations différentielles à coefficients constants *que l'on saura résoudre.*

On sait enfin combien les théories doivent évoluer rapidement pour interpréter les nouveaux faits d'expérience.

L'expérience est donc indispensablement liée à la recherche, mais, et nous voulons appuyer sur ce point, elle ne remplace pas entièrement la pratique, c'est-à-dire, *l'expérience renouvelée chaque jour* suivant la forte remarque de Boucherot et, pouvons-nous ajouter, *l'expérience renouvelée chaque jour dans les conditions de la réalité.*

C'est pourquoi les appareils nouveaux ne doivent être mis en service que progressivement et judicieusement, si l'on ne veut pas aboutir à de cruels mécomptes.

Un haute culture scientifique est aujourd'hui indispensable à l'ingénieur électricien : la présidence de M. Fabry ce soir, si hautement symbolique, me dispense d'insister.

Des appareils remarquables ont cependant été créés grâce au bon sens de praticiens. C'est à ce bon sens, poussé parfois jusqu'au génie que les Gramme, les Edison, etc... ont dû leur gloire.

D'ailleurs, la culture trop exclusivement mathématique de nos grandes écoles, résultant peut-être des méthodes qui ramenaient la physique à un chapitre de la mécanique et dont Laplace fut le plus illustre représentant, a souvent trop éloigné nos Ingénieurs et même nos savants de la recherche expérimentale.

De là, le retard de l'introduction en France de la théorie des ions et des électrons dont J.-J. Thomson fut, en Angleterre, l'animateur le plus frappant, suivi, longtemps après, en Amérique, par de savants ingénieurs, Langmuir, Coolidge, etc... On sait l'intervention féconde en France de M. Langevin dans ces théories.

D'ailleurs, si nous sommes réunis ce soir dans cette salle, c'est peut-être parce que Faraday, qui n'était pas mathématicien, avait le génie de l'observation et de l'expérience joint à un génial bon sens. Ainsi ont pu être jetées les bases des lois de l'induction sur lesquelles nous vivons tous.

Cela n'empêche pas que Maxwell, en mettant d'une manière non

Digitized by Google

moins géniale, sous forme mathématique, les idées de Faraday, a pu prévoir les ondes Hertziennes.

Expérience, théorie mathématique et pratique doivent donc être utilisées conjointement et plus intimement en technique qu'en science pure. D'ailleurs, où finit la science pure et où commence la technique ? les plus grands physiciens n'ont-ils pas presque toujours envisagé ou réalisé des applications ?

Vous me permettrez de vous rappeler une boutade de POTIER, consulté sur la théorie d'une machine nouvelle : « Faites d'abord l'expérience, nous ferons toujours la théorie ».

Mais cette expérimentation nécessaire a été fort négligée dans ces dernières années en France jusqu'à la guerre. J'exposais ici en juin 1920 (1) les raisons du manque d'élan dans la construction électrique en France avant la guerre.

Je faisais ressortir les inconvénients et les mécomptes que l'on a rencontrés en achetant à l'étranger des plans de matériel. Je rappelais aussi que les films suisses d'ŒRLIKON et de BROWN-BOVERI n'ont pas plus d'ouvriers que nos grandes maisons françaises et que, par suite, une importance égale à celle des maisons américaines n'était pas une condition indispensable du succès.

Mais la Grande Guerre a changé nos habitudes et fortement limité notre rôle de banquiers internationaux, alimentant les emprunts étrangers ou même les industries étrangères; elle nous place dans la situation de l'homme ruiné, mais plein de force, qui veut refaire fortune et auquel l'oisiveté est interdite.

Ce n'est pas triste.

L'industrie française a trouvé et trouvera beaucoup plus de ressources financières qu'avant guerre, malgré sa pénurie d'or. Car la véritable puissance économique d'un pays réside dans sa santé et dans la rapidité avec laquelle la richesse y circule. Pour cela, il faut de l'intelligence et de l'énergie, dont la France est abondamment pourvue; elle peut donc prétendre au progrès et à une place au premier rang des grandes nations. Une forme d'esprit nouvelle est née et de tous côtés, dans l'industrie, l'on se tourne vers la recherche scientifique et on y fait appel à l'esprit d'initiative.

Toute affaire industrielle sagement menée doit consacrer une partie de ses bénéfices ou, plus exactement, de ses ressources, à la recherche,

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, T. X, 3e Série.

Digitized by Google

pour ne pas périr de mort plus ou moins lente et pour cela il lui faut disposer de laboratoires industriels.

II. — Résultats acquis.

Laboratoire Central. — Dans l'industrie, l'expérimentation quantitative repose sur l'emploi d'étalons de mesure et souvent elle exige l'intervention d'un organe *indépendant* et de toute confiance. Il est donc nécessaire qu'il existe un laboratoire central bien outillé et évoluant continuellement sous la direction d'ingénieurs possédant l'esprit scientifique.

Grâce à son directeur, M. Janet, assisté de ses savants collaborateurs, MM. Jouaust, De la Gorce et autres, le Laboratoire Central d'Electricité remplit bien ce rôle.

Je crois qu'une liaison avec des grandes centrales électriques rendrait possibles des expériences mettant en jeu les grandes puissances qui sont souvent nécessaires, mais qui dépassent les moyens même de nos plus grandes sociétés de construction.

Il y a huit ans, cherchant un moyen d'expérimenter l'appareillage pour la traction électrique, j'avais pensé demander, à M. Ernest Mercier, le concours de l'Union d'Electricité pour mettre à la disposition des constructeurs de puissance nécessaire, sous le contrôle du Laboratoire Central. M. Hochstetter avait bien voulu se charger de la négociation. Les esprits étant insuffisamment préparés à cette époque, l'idée n'a pas abouti, mais elle a été reprise récemment en vue de l'essai des interrupteurs de grande puissance sous le contrôle du Laboratoire Central.

Les essais d'accumulateurs, les essais de conductibilité thermique des isolants par le Laboratoire central ont rendu de grands services.

Enfin, bien souvent, des méthodes de mesure nouvelles naissent dans une industrie non encore éduquée. Les conseils des ingénieurs du Laboratoire Central spécialisés ont déjà rendu et peuvent rendre de grands services. On sait le rôle de M. Jouaust en T. S. F., rôle si apprécié par M. le Général Ferrié. En résumé, grâce au Laboratoire Central, il est possible de réduire les tâtonnements en attendant que les industriels s'outillent eux-mêmes.

III. — Rapide examen des moyens actuels d'expérience dans l'industrie.

La plus grande partie des calculs d'ingénieurs ne sont, et bien sou-

Digitized by Google

vent à leur insu, que des interpolations ou des extrapolations. Une théorie, en général, n'est commode que parce qu'elle est un moyen mnémonique de retenir ou de relier un grand nombre de faits (Henri Poincaré). Les grands ingénieurs qui se sont le plus distingués dans les dernières années, Rice, Steinmetz, Behn-Eschenburg, etc... passaient une partie de leur temps aux plateformes d'essai. Le fait que Potier et Blondel ont longtemps fréquenté les plateformes d'essai, explique sans doute pour une grande part le bon sens remarquable dont ils ont toujours fait preuve, et M. Blondel a continué à expérimenter en dehors des plateformes.

Une maison importante doit avoir, en dehors d'un chef de plateforme, des ingénieurs de haute culture occupés de perfectionnements ou recherches. *C'est là que s'élabore la fortune future de la Maison.*

Sans avoir la prétention de dresser ici un inventaire complet des moyens actuels d'expérimentation réalisés dans l'industrie électrique française, nous nous bornerons à en indiquer les plus saillants, en nous excusant d'avance de nos omissions involontaires.

Société Alsacienne de Constructions Mécaniques.

Après s'être assuré la documentation de la Maison Siemens, elle a développé ensuite et amélioré la construction par ses propres moyens. Le rapide essor de cette branche de ses constructions est dû au regretté Zweifel qui s'est épuisé dans la lutte, mais qui a laissé des élèves dignes de lui et qui ont développé son œuvre avec ampleur sous la haute direction de M. Hochstetter.

Le succès de la S. A. C. M. est dû, en grande partie, à l'importance qu'elle a attribuée à la recherche, complétée par un service de documentation bien organisé.

Avec méthode, elle n'épargne, ni temps, ni argent dans ce but.

Un laboratoire d'essai de 500 m² de superficie comprend :

1° *Pour les essais chimiques :*

a) une salle de chimie générale;

b) une salle des réactions acides;

c) une salle des balances.

2° *Pour les essais mécaniques :*

a) Une salle d'essais mécaniques comportant deux machines de traction de 50 et 5 tonnes respectivement; une presse à biller de Brinell, un mouton Charpy de 30 kilogrammètres, un mouton à chute libre

Digitized by Google

de 150 kilogrammètres, une machine d'essai des fils à la torsion, une machine d'essai à la flexion, une machine d'essai des tôles au pliage ;

b) une salle des traitements thermiques avec un four Meker de grandes dimensions, la température pouvant atteindre 1 400°C.

3° *Pour les essais micrographiques* : des dispositifs d'attaque, de polissage et d'examen microscopique;

4° *Pour les essais électriques et magnétiques* : des dispositifs permettant :

a) l'essai diélectrique des huiles et isolants;

b) l'essai des tôles pour dynamos et transformateurs avec appareil Epstein, fluxmètre Grassot, perméamètre Iliovici ;

c) mesure des conductibilités avec pont de Thomson et pont de Kohlrauch pour solides et liquides.

5° *Pour les essais physiques divers* : des dispositifs permettant :

a) l'essai calorimétrique;

b) l'étalonnage des pyromètres;

c) l'étalonnage des thermomètres.

Mais, à côté de ce laboratoire de base, des plateformes d'essais réparties dans les différents ateliers permettent d'expérimenter les machines.

Une chambre noire pour essais aux tensions allant jusqu'à 500 000 V, permet des essais d'effluves.

Plusieurs bancs pour moteurs de traction sont pratiquement disposés pour l'essai en récupération, de 110 à 3 000 V en courant continu. Pour les différentes constructions usuelles, il y a aussi des montages tout préparés. La puissance disponible à chaque instant est de l'ordre d'un millier de kilowatts, croyons-nous, mais elle peut être augmentée dans ces cas spéciaux.

Une ligne d'essai d'environ 500 m à voie normale avec ligne caténaire, permet de débrouiller, en première approximation, les conditions de fonctionnement des locomotives.

En dehors du chef des différentes plateformes, des ingénieurs expérimentés s'occupent principalement de recherches en dehors de leurs essais de machines courantes. Je suis heureux de rendre hommage en particulier aux qualités d'expérimentateur de M. Bauman.

En outre, l'esprit de la Maison s'adapte avec souplesse à l'exécution préliminaire de types en vue de diminuer les risques des machines nouvelles et ces essais donnent parfois des surprises agréables. En particulier, les alternateurs à haute fréquence (Bethenod, Latour) ont

Digitized by Google

donné des résultats bien supérieurs à ceux escomptés par le calcul. Il en fut de même pour le premier alternateur de Gennevilliers conçu avec fuites, suivant les conseils de BOUCHEROT.

Et de tout cela, les actionnaires n'ont pas à se plaindre.

Compagnie Française Thomson-Houston. — Bien que disposant, et de la documentation de la G. E. C°, et de moyens de contrôle très larges, cette Compagnie sera nécessairement poussée à développer de plus en plus ses services de recherches. Nous croyons savoir que la direction générale a bien cette intention, mais nous manquons totalement de documents susceptibles de vous intéresser. Nous savons cependant qu'elle dispose d'un laboratoire pour l'essai des matières premières.

Compagnie Electro-Mécanique. — Cette Société travaille en collaboration intime avec Brown-Boveri et profite des remarquables laboratoires de recherche de la Société suisse. Elle dispose cependant de moyens propres appréciables.

Elle a surtout expérimenté, au Havre, sous la direction de M. BUSS, sur les condensateurs et sur les machines à froid construites d'après les procédés LEBLANC. M. DARRIEUS poursuit les recherches de Maurice LEBLANC, sur les machines frigorifiques à vapeur d'eau.

Ateliers de Jeumont. — Je ne connais pas les nouveaux ateliers, mais il faut noter que cette Société a eu le mérite d'obtenir, par ses propres moyens, des réalisations remarquables, particulièrement pour les machines à courants alternatifs à collecteur. Je dois ici rendre hommage à mon regretté collègue Joseph PERRET, qui a été en matière technique l'animateur des ateliers du Nord et de l'Est. Il était d'ailleurs conseillé par Marius LATOUR. Les ateliers de Jeumont sont une bonne affaire industrielle.

Mais j'ai dit que, toute proportion gardée, toute affaire peut trouver profit à poursuivre des recherches, c'est ce que montrent les exemples suivants :

Maison Bréguet. — Organisée pour construire du matériel de moyenne puissance, transformateurs, dynamos, alternateurs, moteurs jusqu'à 2 000 kW environ, turbos jusqu'à 6 000 kW, elle a en outre créé des types particuliers, tels que les machines Boucherot à double

Digitized by Google

cage qui ont conquis le marché mondial. Elle a réalisé avec succès de nombreuses machines asynchrones à excitation rotorique. La marine lui a commandé des équipements de tourelles (procédés Routin), des projecteurs et, d'une manière générale, du matériel électrique de bord. Une plateforme pratique et bien organisée y permet d'employer les appareils de mesure les plus modernes, soit pour les essais mécaniques, soit pour les essais électriques, fluxmètre, oscillographe, appareil d'Epstein, appareils stroboscopiques, etc... Une cabine d'essai est consacrée au matériel pour milieux explosifs.

Un laboratoire d'optique permet le contrôle des miroirs paraboliques.

C'est à l'esprit d'initiative du regretté Sciama qu'est dû ce développement. M. Callou, son Administrateur Délégué, suit résolument la même ligne de travail.

Ragonot. — Ce constructeur exécute rationnellement le petit matériel, guidé par une expérimentation méticuleuse; il résout tous les problèmes intéressant les très petites machines et il a largement rattrapé le retard de la construction française en petit matériel.

Appareillage. — Dirigés par M. de Raémy et sous la direction technique de M. Roth, les ateliers de Delle se sont organisés en vue d'obtenir une amélioration continuelle de leur construction.

Câbles. — La câblerie française occupe une place intéressante dans l'industrie mondiale. M. Ernest Mercier lui a fait faire un bond en l'entraînant à réaliser des câbles à 60 000 volts pour l'Union d'Electricité. Je citerai parmi les fabricants de câbles, la Maison Geoffroy et Delore qui s'est développée sans aucune liaison étrangère. Elle a prévu au cours de ses recherches, il y a vingt ans, les câbles à surface métallisée. Je suis heureux de mentionner à ce sujet le rôle de son Ingénieur Conseil, notre ancien Président M. Picou, qui a d'ailleurs beaucoup cherché dans d'autres domaines et qui en particulier à l'antériorité des pôles de commutation pour machines à courant continu.

Vous connaissez tous les beaux travaux de M. Delon aux câbles de Lyon et son dispositif de redresseur à contact tournant. De même les câbleries de Jeumont, de la S. A. C. M., etc., recherchent et expérimentent continuellement.

Appareils de mesure. — Nous avions un retard considérable qui

Digitized by Google

tend à disparaître et sur certains points nous sommes en tête. La Maison Carpentier, sous la direction de M. J. Vassillière-Arlhac développe la fabrication d'appareils de mesure de laboratoire et s'oriente aussi vers les appareils industriels. Elle est, croyons-nous, en très bonne voie non seulement pour la construction, mais pour les recherches. La Compagnie des Compteurs, sous la direction avisée de M. Delalande, devient un constructeur important d'appareils industriels. Son laboratoire de recherches, dirigé par M. Dubusc et avec des ingénieurs conseils tels que MM. Blanchet, Grassot, Iliovici, a travaillé sérieusement et abouti à des créations remarquables, j'ai pu le constater. Elle dispose d'ailleurs des renseignements de la G. E. C°. A côté d'elle, d'autres Maisons telles que Delagrange, ont mis au point des oscillographes pratiques en répandant l'invention de notre Président d'Honneur M. Blondel, qui en a vu tout l'avenir il y a vingt-cinq ans.

Enfin, la maison Beaudouin a lancé l'oscillographe cathodique Dufour, appareil remarquable qui a des clients tels que la G. E. C°, Brown-Boveri, etc... Avec cet appareil M. Fallou a fait les études tout à fait intéressantes que vous connaissez.

La Maison Lepaute, conseillée par M. Guillet, a réalisé des appareils de stroboscopie, dont l'emploi en mécanique permet de suivre en ralenti le mouvement des pièces rapides telles que soupapes, bielles, etc...

L'exploitation de ces procédés stroboscopiques a été reprise par la Société de Mécanique Ondulatoire.

L'Hewittic fait des recherches sous la direction technique de Maurice Leblanc. Grâce aux recherches entreprises par Demontvignier, elle a mis au point des redresseurs à mercure de verre de grande capacité appliqués en traction de tramways, traction sur canaux, etc... M. Florisson a réalisé les appareils à ultra-sons imaginés par Langevin. Touly a fait des recherches sur la transformation par tubes à vide du courant continu en courants alternatifs, dans la voie ouverte par le regretté Maurice Leblanc.

La Société de Recherches et de perfectionnements industriels, grâce au concours de MM. Dunoyer et Toulon, a étudié des relais à arc avec de nombreuses applications et breveté le relais à gaine auquel la G. E. C° s'est intéressée.

Digitized by Google

A la Thonsom-Houston, M. TOULON expérimente un redresseur à arc avec électrodes en cuivre et étincelles pilotes de son invention.

Le laboratoire Ampère, avec ses dispositifs d'essai à un million de volts, a doté l'industrie française de moyens indispensables d'expérimentation pour le matériel à haute tension.

La Compagnie Générale de T. S. F., grâce à ses ingénieurs distingués dont M. BETHENOD, poursuit continuellement ses recherches.

Les Etablissements Gaiffe, Gallot, Pilon, sous la direction technique de M. GUNTHER et grâce au concours de M. SAGET, munis d'ailleurs de la documentation G. E. C°, ont entrepris la réalisation de nouveaux appareils.

Vous connaissez les appareils redresseurs par Kénotrons et condensateurs étudiés par M. SAGET et pouvant donner 15 kW sous 500 000 V au moyen desquels M. PERRIN espère pénétrer plus avant dans la connaissance de la constitution de la matière.

Nous devons citer les piles Féry et son nouvel accumulateur à gaine qui semble remarquable.

Eclairage et lampes. — Nous étions très en retard et on sait l'avance prise à ce point de vue par la G.E.C° avec Philipps et la Western, grâce à leurs laboratoires de recherches. Mais la section encore nouvelle de l'Eclairage à l'Ecole Supérieure d'Electricité, conjointement avec l'Institut d'Optique dirigé par M. FABRY et la Société de perfectionnement de l'Eclairage, sous l'impulsion de son administrateur Délégué M. VALBREUZE, doivent hâter les recherches, les réalisations nouvelles et étendre les applications.

M. HOLWECK, Ingénieur, a réalisé des lampes triodes à électrodes démontables et des pompes moléculaires construites par la Maison Beaudouin. Les lampes à Néon, de Georges CLAUDE, se sont répandues dans le monde entier et sont appliquées heureusement en stroboscopie.

Les Etablissements Belin, sous l'active impulsion de M. BELIN, avec le concours de M. HOLWECK et de ses jeunes collaborateurs, ont placé la France à la tête des nations pour la réalisation de la télautographie, et de la télévision.

Dans le même ordre de recherches, il faut citer aussi le nom de M. VALENSI, ingénieur en chef des postes et télégraphes.

Enfin, pour terminer, nous citerons le compas d'induction qui a dirigé d'une manière si précise LINDBERGH vers le Bourget. Il fut imaginé par DUNOYER. Saluons ce retour triomphal d'Amérique.

Digitized by Google

CONCLUSION

Le rapide examen des résultats des recherches et des applications depuis la guerre, montre ce qu'on peut attendre du travail de création en France, aussitôt qu'on lui fournit quelques moyens d'action.

Le lien de servitude entre l'industrie électrique française et l'industrie étrangère que je dénonçais en 1920, est à peu près à l'état de souvenir. Bien entendu, des accords internationaux légitimes pour la mise en commun des progrès obtenus subsisteront toujours et avec juste raison, car la science est internationale.

Pour avoir des amis, en technique comme ailleurs, il faut être fort. Pour cela, il faut développer l'esprit d'observation et d'expérience dès l'Ecole. C'est la formation expérimentale qui est à la base des travaux de Boucherot, de Georges Claude, de Fery, de Bunet, etc... Des Ecoles spéciales sont indispensables qui doivent être indépendantes sous la tutelle des industriels, c'est je crois, l'opinion de M. Geoffroy.

Seuls les industriels, disposant de moyens d'évoluer vite ce qui, pour eux, est une question de vie ou de mort, peuvent donner l'impulsion nécessaire.

Le manque d'écoles spéciales de téléphonie et de télégraphie contrôlées par l'industrie, nous a placés dans une situation singulière.

A ces écoles, il faut des professeurs savants, sans doute, mais aussi ayant un contact étroit avec l'industrie. C'est cette union que l'esprit éclectique et accueillant de M. Janet a si bien réalisé à l'Ecole Supérieure d'Electricité. Les professeurs devraient périodiquement faire de longs séjours à l'étranger. On devrait développer peut-être les thèses d'ingénieurs et les bourses d'études pour jeunes ingénieurs.

Mais surtout, il faut glorifier l'esprit d'énergie et de ténacité réfléchie dès l'enfance et développer chez l'ingénieur le respect de la vérité trouvée par l'expérience.

La diplomatie savante est impuissante seule pour réaliser une grande industrie. Diminuons le dewatté, augmentons le watté. Le culte de la vérité sortant des laboratoires ou des recherches est la grande affaire et elle paie toujours si elle est orientée judicieusement dans la mesure des moyens. Suivons donc l'exemple d'une firme à l'échelle des maisons françaises : la Société Brown-Boveri qui vit de ses recherches.

Digitized by Google

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE A LA SOCIÉTÉ BROWN-BOVERI

par M. Darrieus.

Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique (1)

Introduction

L'organisation de la recherche scientifique à la Société Brown-Boveri remonte approximativement au lendemain de la guerre. A ce moment cette Société, qui avait trouvé jusqu'alors en Europe la majeure partie de son domaine d'activité, avait à faire face à de nouvelles conditions économiques qui lui fermaient la plupart de ses anciens débouchés, notamment ceux très importants de la Russie et de maints autres pays à change déprécié, comme la Pologne, l'Allemagne, l'Autriche et dans une certaine mesure la France et l'Italie, sans que les nouveaux marchés recherchés activement en Amérique et en Extrême-Orient fussent à même de remplacer immédiatement ceux qu'elle venait ainsi de perdre.

En présence de cette situation, les dirigeants de la Brown-Boveri comprirent que, dans un petit pays peu pourvu de matières premières, et ne disposant que d'une main-d'œuvre chère, que de longues années de prospérité avaient accoutumée à une certaine aisance, une grande industrie ne pourrait subsister qu'en compensant des conditions *a priori* aussi défavorables, par l'excellence de ses produits et la recherche constante de spécialités moins assujetties que le matériel commun à une âpre concurrence. Ils ne faisaient en cela que suivre la tradition du fondateur de la Société, C. E. L. Brown qui, inventeur lui-même, avait toujours fait dépendre la prospérité et l'indépendance de son entreprise, de la mise en valeur d'un ensemble constamment rajeuni de nouvelles inventions, telles que celles des Leblanc, Parsons, Rateau... etc. Aussi, malgré une crise sévère qui faisait suspendre pendant quelques années la distribution des divi-

(1) Communication présentée à la séancee du 6 juillet 1927 de la Société Française des Electriciens.

Digitized by Google

dendes, consacrèrent-ils des sommes importantes à l'établissement de laboratoires modernes de physique, de chimie, de métallographie et d'essais des matériaux.

Outre les essais courants de contrôle et de réception qui s'imposent à toute fabrication moderne, et l'étalonnage des appareils de mesure en usage dans les ateliers, ces laboratoires entreprennent des recherches d'ordre fondamental. C'est ainsi qu'ont été étudiés dans ces dernières années les traitements thermiques et mécaniques des tôles magnétiques et les méthodes d'essai des huiles de transformateurs.

Nous n'insisterons pas, malgré leur importance pratique, sur les recherches d'ordre électrotechnique, parce que le sujet en est assez généralement connu; nous nous bornerons à mentionner, parmi les plus remarquables, des essais approfondis sur les ondes à front raide et leur propagation le long des enroulements de transformateurs, la mesure des pertes dans les diélectriques (1), les phénomènes de court-circuit des turbo-alternateurs, le fonctionnement des interrupteurs à huile, dont la complexité commence à être éclairée par ces études méthodiques; enfin, l'étude physique approfondie de l'arc à vapeur de mercure en vue du perfectionnement des redresseurs qui, déjà dotés du contrôle automatique du vide, viennent tout récemment d'être munis d'un dispositif de protection contre les courts-circuits internes dont l'efficacité paraît décisive.

Recherches d'ordre mécanique.

L'étude entreprise au lendemain de la guerre par le Dr de Freudenreich, élève du Pr Stodola et du Pr Pierre Weiss, et ex-assistant de ce dernier, et le célèbre mémoire d'Osborne Reynolds sur les conditions théoriques de fonctionnement des paliers, conduisirent la Brown-Boveri à entreprendre sur ces principes la construction d'un palier de butée à segments dans le genre de celui développé en Grande-Bretagne par Michell, et aux Etats-Unis par Kingsbury (1). Les essais très étendus entrepris à cette occasion par le Dr Freudenreich, auquel venait d'être confié le nouveau service de recherches mécaniques, confirmèrent d'une manière très satisfaisante la théorie, en mettant toutefois en évidence l'influence assez considérable que présente sur le fonctionnement, l'échauffement progressif du film d'huile laminé le long de la profondeur du patin, et la diminution de viscosité qui en est la

(1) *Revue B. B. C.* mai 1926 p. 115.
(2) Paliers de butée modernes, *Revue B. B. C.* (1917) p. 3, 36, 58, 86.

Digitized by Google

conséquence. Il résulte ainsi de cette variation de la viscosité que le centre de pression, que la théorie initiale, perfectionnée par MICHELL, plaçait plus près du bord amont du segment, se rapproche du bord de sortie au point de pouvoir être souvent confondu avec le centre de figure, ce qui est évidemment un avantage au point de vue de la possibilité de renverser le sens de rotation.

Rappelons en passant le témoignage particulièrement frappant qu'a donné l'Amirauté anglaise du rôle exceptionnel qui revient à cette invention dans l'évolution moderne de la technique, puisqu'en fournissant des paliers de butée enfin économiques, d'un fonctionnement automatique, dissipant très peu d'énergie, et par là même sûrs, elle a permis de réaliser, sur les bateaux, la turbine à engrenages et sur terre, les plus grandes turbines hydrauliques à axe vertical.

Des recherches furent ensuite entreprises sur les paliers porteurs, qui avaient déjà fait l'objet de diverses théories de la part de REYNOLDS, SOMMERFELD, GUMBEL... etc., et conduisirent, à l'opposé des règles empiriques alors admises, à un raccourcissement considérable par rapport au diamètre, de la sole des tourillons, et à une grande augmentation du jeu radial, tandis que le rôle reconnu nuisible des pattes d'oie les faisait abandonner.

Le développement de la turbine dite « limite » auquel la Brown-Boveri s'est vue contrainte d'apporter sa contribution, posait deux sortes de problèmes relatifs, les uns à l'écoulement de la vapeur dans les premiers étages à action et à admission partielle, les autres à la résistance des disques de plus en plus minces auxquels conduisait l'augmentation constante des vitesses périphériques. Les travaux de la première catégorie, portant sur le sujet ingrat des régimes d'écoulement aux vitesses dépassant la vitesse du son, de la déviation du jet et de la formation d'ondes de discontinuité à la sortie des tuyères, ne pouvaient que faire ressortir l'extrême complexité d'une question dont la mise en lumière complète intéresse d'ailleurs davantage la balistique que la construction des machines, dès l'instant que la préoccupation d'un bon rendement doit faire rejeter en principe ces conditions anormales de fonctionnement.

Certains résultats plus ou moins empiriques ont cependant été obtenus, permettant d'atténuer les pertes que ce mode de détente de la vapeur comporte nécessairement, et qui font de la partie à action des turbines modernes, celle qui laisse encore le plus à désirer.

Tandis que la General Electric Company réussissait à rendre compte d'un certain nombre de cas de vibrations de disques par l'influence du

Digitized by Google

fluide ambiant agissant sur eux à la manière du vent qui fait flotter un drapeau, les recherches théoriques et expérimentales de la Brown-Boveri, conduites avec l'aide du professeur STODOLA, ont permis d'élucider entièrement le problème plus fondamental des vibrations propres des disques de profil quelconque, en tenant même compte des tensions internes que développe, par différence de température entre le centre et la périphérie, le transport de chaleur centripète ou centrifuge qui se produit généralement le long du rayon (1).

Ces recherches ont utilisé des mémoires scientifiques de lord RAYLEIGH, LAMB, SOUTHWELL, WALTER RITZ, notamment une méthode générale due à ce dernier physicien pour le traitement des problèmes aux dérivées partielles de la physique mathématique; cette méthode très élégante, que son caractère intuitif faisait qualifier par Henri POINCARÉ de méthode d'ingénieur, avait déjà permis à RITZ de traiter entièrement le problème difficile des figures de CHLADNI ou des vibrations propres des plaques d'épaisseur uniforme. Le cas plus complexe des vibrations de disques de turbines, s'il n'a pu recevoir la même solution rigoureuse, offre au point de vue qualitatif les mêmes particularités de lignes nodales radiales et circulaires, et la solution quantitative approchée à laquelle ont conduit les recherches ci-dessus, peut être considérée comme pleinement satisfaisante au point de vue pratique.

Le retour, dans les centrales modernes, à l'emploi des turbines à détente prolongée, à grand nombre d'étages et à plusieurs corps, fait dépendre dans une large mesure la réduction ultérieure de consommation de vapeur, de l'amélioration du rendement intrinsèque ou rendement hydraulique de l'aubage.

Des recherches systématiques sur la meilleure forme et l'espacement optimum à donner à ces aubes, ont confirmé la présomption de PARSONS que justifient d'ailleurs des considérations de principe empruntées à la théorie moderne de l'aile portante, et d'après laquelle le meilleur rendement réalisable avec un type donné d'ailette, correspond au degré de réaction 1/2, c'est-à-dire à un partage égal de la détente entre les aubes fixes et mobiles; les valeurs ainsi trouvées sont très élevées, dépassant parfois 95 pour cent pour les grands nombres de REYNOLDS, comme pouvaient le faire présumer les rapprochements féconds qui ont été établis entre ce domaine et ceux voisins des résistances de carènes, des pertes de charge dans les conduites, ou des essais aérodynamiques intéressant l'aviation.

---

(1) Essais de disques aux vibrations. *Revue B. B. C.* 1923, 231.

Digitized by Google

Toutes ces recherches sont aujourd'hui dominées par la considération de la loi de similitude désormais célèbre due à Osborne Reynolds, qui permet, dans l'étude d'un régime d'écoulement, ou la détermination du rendement hydraulique, de substituer au fluide en vue, air ou vapeur, l'eau avec laquelle les essais, portant sur des dimensions plus grandes, des vitesses plus faibles, et entraînant une consommation d'énergie moindre, sont beaucoup plus faciles; les résultats en restent exactement semblables, sous les seules conditions que la compressibilité du fluide gazeux n'intervienne pas sensiblement, et que le nombre de Reynolds $\frac{\rho v d}{\mu}$, quotient par la viscosité μ du produit de la densité du fluide ρ, de la vitesse v et d'une dimension homologue du système d, soit le même dans les deux cas.

Rédaction des rapports d'essai

Le succès et l'utilité de ces recherches tiennent en grande partie, d'une part à la documentation abondante dont disposent ceux qui s'y consacrent, d'autre part à l'ordre et à la discipline qui règlent l'établissement des rapports d'essai, et, en permettant d'en constituer des archives précieuses, augmentent considérablement la valeur des travaux effectués; ces rapports sont établis suivant un plan uniforme où se trouvent développés successivement la raison d'être et l'objet de l'essai, les recherches exécutées, leur rattachement aux travaux antérieurs, les suggestions tendant à l'amélioration de la méthode, de l'appareil ou du produit étudiés, enfin un résumé et des conclusions.

A cet effet, les ingénieurs du service des essais disposent, outre de locaux spacieux et confortables, du temps nécessaire pour mettre au point et coordonner les résultats de leurs mesures, les confronter aux travaux analogues trouvés dans la littérature technique, enfin mûrir et rédiger sous une forme correcte leur propre travail.

Enfin, un élément essentiel de la fécondité de ces recherches réside dans le fait que, si beaucoup de ceux qui y procèdent, sont aussi aptes à étudier un mémoire de physique mathématique qu'habiles expérimentateurs, nul ne risque, dans ce milieu qui groupe des chercheurs de formation très diverse, depuis notre Ecole polytechnique et le Polytechnicum de Zurich, jusqu'aux écoles pratiques suisses, de perdre de manière durable le contact de l'expérience, ou de poursuivre trop loin une spéculation hasardée et sans issue.

En terminant, nous exprimerons le vœu que cet exemple soit suivi plus généralement en France, où d'une part l'enseignement des ma-

Digitized by Google

thématiques supérieures néglige trop l'étude des moyens pratiques de calcul, par approximations, ou graphiques, ou mécaniques, grâce auxquels peut être souvent poursuivie avec succès la solution d'un problème de physique qui se heurte par exemple à des difficultés d'intégration insurmontables, tandis que, d'autre part, les réalisations de beaucoup de nos grands inventeurs ont souffert trop souvent d'un manque de liaison entre savants et praticiens, et de la rareté de constructeurs à la fois instruits et expérimentés.

Conclusion

Nous devrions mentionner, pour être complets, beaucoup d'autres essais systématiques et analytiques, relatifs par exemple aux vibrations des ailettes, à l'entraînement par la vapeur des vésicules d'eau qui résultent d'une condensation partielle dans les derniers étages des turbines et sont une cause d'érosion (1)... etc.; mais nous espérons que ce court aperçu des principales recherches de la Brown-Boveri aura suffisamment fait ressortir que l'exemple de cette Société illustre bien le précepte de Sir Charles Parsons, d'après lequel toute industrie qui veut rester prospère et vivante, doit non seulement, pour maintenir au plus haut degré de perfection ses procédés de fabrication et de contrôle, mais encore pour ne pas se laisser distancer dans l'adaptation d'inventions nouvelles et rester attentive à leur essor prochain, consacrer à la recherche proprement dite un budget annuel de 1 à 3 pour 100 de son capital.

Si beaucoup de Sociétés industrielles, qu'une prospérité factice et momentanée a malheureusement détournées jusqu'à présent de cet effort nécessaire, peuvent juger ces charges lourdes pour leurs ressources actuelles, l'expérience a montré surabondamment dans ces dernières années, qu'à la condition que de telles sommes soient judicieusement employées, il n'est pas de meilleur placement, ni de frais généraux plus productifs.

(1) Dr. de Freudenreich. L'influence nuisible de la vapeur humide dans les turbines à vapeur. *Revue B. B. C.* mai 1927, p 119.

Digitized by Google

LE LABORATOIRE DE RECHERCHES DE LA GENERAL ELECTRIC C°

par M. F. Duclert,

Ingénieur à la Compagnie française des procédés Thomson-Houston.

De retour des Etats-Unis après un séjour de trois années dans les Usines de la General Electric C°, où j'avais été envoyé en mission par les soins de la Compagnie Française Thomson-Houston, j'ai été très heureux lorsqu'on m'a demandé de vous parler aujourd'hui du merveilleux Laboratoire de Recherches que cette Compagnie possède. Mais, avant de vous donner plus de détails sur ce point, je voudrais vous faire un rapide historique de la General Electric C°. Celle-ci est la plus grosse Usine d'Amérique pour la construction de tout ce qui se rapporte à la production et à l'utilisation de l'électricité. Fondée il y a quelque 35 ans par la fusion de la Compagnie Edison et de la Compagnie Thomson-Houston, elle est actuellement au capital de 240 000 000 de dollars, soit approximativement 6 milliards de francs, avec, pour chacune des trois dernières années, un chiffre d'affaires annuel de 7 milliards 1/2 de francs et un revenu net de 1 milliard.

La General Electric C° a 45 usines plus ou moins spécialisées dans diverses branches de l'industrie électrique. Elles sont situées dans diverses branches de l'industrie électrique. Elles sont situées dans un rayon de 500 km entre Boston et Chicago; elles occupent 75 000 ouvriers, dont 21 000 pour l'Usine principale qui se trouve à Schenectady, à mi-chemin entre New-York et la frontière Canadienne.

Ces chiffres nous frappent par leur importance et nous donnent de suite une idée des moyens considérables dont une pareille Compagnie peut disposer pour entretenir des laboratoires coûteux. Pour ses divers laboratoires, la General Electric C° dépense près de 100 millions de francs par an, dont plus de 40 pour son seul laboratoire de recherches. Les principaux de ces laboratoires sont les suivants :

Un laboratoire à 1 million de volts pour l'essai des transformateurs et des isolateurs de lignes à haute tension.

Digitized by Google

Un laboratoire pour la détermination de la capacité de rupture des disjoncteurs dans l'huile de grande puissance.

Un laboratoire spécialisé dans les questions d'éclairage.

Je me bornerai à vous parler du Laboratoire des Recherches scientifiques.

Situé à Schenectady, il comprend deux splendides bâtiments en ciment armé de 5 étages; il occupe une surface de 50 000 m² avec des centaines de salles où les Ingénieurs ont tout le confort et tous les crédits nécessaires pour mener à bien leurs recherches.

Le personnel comprend 360 employés dont 100 ingénieurs. Le recrutement de ces derniers est facilité par la méthode d'enseignement américaine. Les étudiants font, en effet, des stages dans les usines ou dans les laboratoires pendant leurs périodes de vacances. Il est ainsi plus facile de faire un choix lorsqu'ils sortent de l'école. On recherche principalement chez eux l'esprit d'observation, d'invention et de recherches, l'esprit d'originalité comme on dit en anglais. On désire en outre qu'ils soient optimistes, l'optimisme étant une des qualités qui font la réussite de la race américaine.

Les ingénieurs du Laboratoire profitent, comme leurs collègues des services de fabrication, du niveau élevé des salaires; ils ont une vie facile et n'ont point en général l'esprit préoccupé par les difficultés de l'existence.

Ils disposent d'un service d'archives remarquablement organisé et d'une bibliothèque générale très complète. Grâce à un système de fiches, ils peuvent rapidement retrouver toute la documentation existant sur le sujet qui les préoccupe et cela, non seulement dans les ouvrages en langue anglaise, mais encore dans ceux en langue française et allemande. Si l'une de ces langues ne leur est pas familière, un service de traducteurs leur fournit rapidement le texte désiré.

Parmi les ingénieurs du Laboratoire, nous trouvons des noms bien connus du monde scientifique :

Le Docteur Whitney, Directeur, remarquable pour ses qualités d'organisateur et d'animateur. Il se montre accueillant à toute idée nouvelle ainsi que l'indique l'affiche collée à sa porte et sur laquelle on lit « qu'il pleuve ou qu'il fasse beau, entrez si vous avez une idée ».

Le Docteur Coolidge, illustre par ses travaux sur les tubes à rayons X, les tubes à rayons cathodiques, l'étirage du tungstène.

Digitized by Google

Le Docteur Langmuir, connu par ses recherches sur les questions atomiques, les pompes à vide à vapeur de mercure, la soudure à l'arc en atmosphère d'hydrogène, les lampes à atmosphère gazeuse, les lampes de T. S. F., etc...

Les savants tels que Steinmetz, Hobart, Alexanderson...

J'ai eu l'honneur de connaître le Docteur Langmuir pendant mon séjour; j'ai eu le plaisir d'être souvent reçu chez lui et j'ai pu ainsi juger un peu du contraste entre la vie du savant américain et celle du savant français. Le savant américain a la vie large, possède une superbe maison, vient à son laboratoire dans une luxueuse limousine, a une villa sur les bords d'un lac. Là, sur ce lac, à chaque week-end, il vit dans un oubli total de ses travaux de laboratoire ; c'est ainsi que j'ai passé des dimanches entiers avec le Docteur Langmuir, soit à construire une digue contre les vagues du lac; soit à établir une estacade; soit encore à consolider la villa construite sur pilotis; soit enfin, les jours d'hiver, à skier ou faire du patin à la voile. Voilà, j'en suis sûr, bien des distractions que peu de nos savants Français ont pu jamais goûter.

Une question intéressante est celle de l'organisation des recherches, de leur orientation.

Un premier point est que les travaux de recherches doivent être organisés en dehors d'une action trop directe des services de fabrication. En effet, quand un individu doit assumer simultanément la responsabilité de la marche des travaux de recherches et des questions de fabrication, il a forcément tendance à trop s'occuper des besoins de cette dernière.

Le directeur du Laboratoire de recherches de Schenectady dépend directement du chef du service des études. L'entière direction du travail de recherches est entre ses mains, sans aucun contrôle de la part des autres services techniques ou des services de fabrication de l'usine.

Le choix des questions à étudier est déterminé par différents facteurs qui peuvent se classer en trois catégories :

En premier lieu, il s'agit de venir en aide à un service pour résoudre un problème qui intéresse directement la fabrication.

En second lieu, il y a lieu de trouver un terrain d'application pour un nouveau produit ou un nouvel appareil susceptible de prendre un développement intéressant dans l'industrie.

Digitized by Google

Rentrant à la fois dans les deux catégories ci-dessus, nous trouvons par exemple : l'invention du glyptal qui est un produit de condensation de glycérine et d'anhydride phtalique. Il remplace très avantageusement la gomme laque pour l'agglomération des paillettes de mica, car il présente des propriétés isolantes très supérieures.

Celle de la textolite qui est constituée par des disques de toile, imprégnés à la bakélite et comprimés à chaud sous forte pression. On obtient ainsi une matière suffisamment solide et homogène pour qu'on puisse y tailler des dents d'engrenages. Ceux-ci, très silencieux, sont actuellement employés dans la commande de l'arbre à cames des voitures automobiles; on les utilise également pour la commande des machines d'imprimerie et des machines-outils, où ils remplacent avantageusement le cuir vert.

Enfin, une troisième catégorie de recherches est celle, sans application pratique immédiate, et concernant certains phénomènes scientifiques généraux encore mal connus. Ces recherches, dirigées dans tous les domaines de la science, ont conduit à des inventions remarquables. Toutes les dépenses engagées dans cette voie ont été couvertes, à une échéance plus ou moins éloignée, par les bénéfices réalisés sur les inventions passées dans le domaine de l'application. Ce sont là d'ailleurs des dépenses nécessaires, car l'industrie américaine est constamment tendue vers le progrès; toute Compagnie qui se contenterait de jouir tranquillement de sa prospérité présente, sans chercher à garder les débouchés, soit par une amélioration de sa fabrication, soit par la création de nouveaux produits, se verrait bientôt distancée par les concurrentes. Ces dépenses sont possibles, non pas seulement parce que les Etats-Unis sont un pays riche, mais surtout parce que tous les constructeurs, comprenant qu'elles sont nécessaires, n'hésitent pas à les engager et peuvent par conséquent les incorporer à leur prix de revient, sans se trouver handicapés les uns par rapport aux autres.

Parmi les recherches de science pure qui ont le plus payé, on peut citer celles du Dr Langmuir sur les électrons, qui ont ouvert un champ si remarquable à la télégraphie sans fil.

Parmi les autres découvertes mises au point par ces recherches pures, je ne vous citerai que les plus frappantes, sans trop entrer dans le domaine technique.

Je vous parlerai en premier lieu du pallaphotophone, car c'est là une des inventions à laquelle je me suis personnellement le plus intéressé. Le pallaphotophone permet l'enregistrement photographique de la voix ou de la musique et une reproduction remarquable par sa

Digitized by Google

pureté et sa netteté, aussi bien du violon que du chant et du piano. Aussi, cet appareil a-t-il révolutionné en Amérique l'industrie du phonographe pendant ces dernières années.

Une autre application de cette invention est le cinéma parlant. Il suffit en effet de prendre simultanément deux photographies, l'une pour les gestes, l'autre pour la voix.

Il est alors facile d'obtenir un synchronisme parfait entre les vues projetées sur l'écran et les paroles reproduites par un pallaphotophone connecté à un haut parleur.

Dans le domaine médical, le Laboratoire de Schenectady s'est créé une place de premier ordre par les travaux des Docteurs Coolidge et Berry.

Le Docteur Coolidge, appliquant les travaux de Langmuir sur les électrons, a mis au point une ampoule à rayons X de grande puissance, universellement employée dans le monde entier. Une autre invention toute récente du Docteur Coolidge est celle de son ampoule à émission de rayons cathodiques à l'extérieur de l'ampoule. Pour cela, les rayons cathodiques, au lieu de venir heurter une anticathode à l'intérieur de l'ampoule, sont projetés sur une paroi très mince en molybdène, qui les laisse sortir de l'ampoule. L'application médicale de ces rayons cathodiques est encore à déterminer, mais on sait déjà que leur effet est foudroyant. Des colonies microbiennes ont été détruites après une exposition de 1 minute. Le système pileux d'un lapin est tombé après une exposition d'une fraction de seconde et l'oreille de ce même lapin a été perforée au bout de 40 secondes.

Les Docteurs Berry et Miller ont attaché leur nom à la mise au point de la fusion du quartz. On a pu ainsi fabriquer des plaques de quartz d'un aspect parfait. Ces plaques sont utilisées en Amérique pour vitrer les salles des hôpitaux où sont en traitement les enfants scrofuleux, car le quartz n'intercepte pas, comme le verre, les rayons ultra violets de la lumière solaire.

Dans le domaine industriel, je me bornerai à vous signaler l'une des dernières inventions les plus importantes au point de vue application et due au merveilleux savant qu'est le Docteur Langmuir. Je veux parler de la soudure à l'arc en atmosphère d'hydrogène. Langmuir dirige un jeu d'hydrogène sur un arc électrique entre deux électrodes en tungstène. Sous l'action de la chaleur, l'hydrogène moléculaire se dissocie et se transforme en hydrogène atomique avec absorption d'une grande quantité de chaleur. Au contact de la pièce à souder, l'hydro-

Digitized by Google

gène reprend sa forme moléculaire et restitue la chaleur absorbée. D'où une soudure parfaite, étant donné l'action réductrice particulièrement efficace de l'hydrogène atomique.

J'ai cherché à vous donner, au cours de cet entretien rapide, une idée des moyens considérables dont dispose la General Electric C° pour effectuer des recherches, non seulement sur les questions intéressant immédiatement l'industrie électrique, mais encore sur celles du domaine général de la science.

J'ai essayé également de vous donner un aperçu des puissantes méthodes de travail et un résumé des merveilleuses inventions réalisées.

Ces renseignements vous montrent combien il est heureux de voir que la Compagnie Thomson-Houston est intimement connectée avec la General Electric C°, non seulement au point de vue technique, mais aussi au point de vue fabrication.

En terminant, je tiens à attirer votre attention sur les facilités étonnantes mises à la disposition des savants du laboratoire de la General Electric C°. Il serait souhaitable qu'en France, où nous possédons des cerveaux remarquables, un tel instrument pût être mis entre les mains de nos savants pour maintenir au premier rang la science française.

Digitized by Google

QUELQUES OBSERVATIONS SUR LES TRAVAUX DE RECHERCHE INDUSTRIELLE A PROPOS DE LA SOCIÉTÉ DE RECHERCHES ET DE PERFECTIONNEMENTS INDUSTRIELS

par M. LEAUTE

Administrateur Délégué de la Société de Recherches et Perfectionnements Industriels (1).

M. Maurice LEBLANC nous a entretenus avec beaucoup de sagacité de la recherche scientifique en dehors des laboratoires. En dehors des laboratoires : donc par les ingénieurs d'atelier.

Les ingénieurs d'atelier jouent un rôle essentiel : seuls, ils connaissent, sur le matériel, sur les habitudes ouvrières, sur les prix de revient, mille détails indispensables pour mener une idée neuve jusqu'à son aboutissement. Mais la question que je voudrais poser, c'est de savoir si ces ingénieurs d'atelier ont toujours la liberté d'esprit et la documentation qu'il faut. Je les ai souvent vus absorbés par leur responsabilité quotidienne et quelquefois mal placés pour connaître ce qui se fait ailleurs que chez eux.

N'a-t-on d'autre issue, quand il en est ainsi, que de recourir aux laboratoires de science pure (c'est ainsi que les appelle M. DARMOIS) ? on peut craindre que ceux-ci n'aient un handicap contre eux sur certains terrains industriels. Dans ces cas-là, une solution mixte s'impose : celle d'un organisme central qui soit un laboratoire, mais qui en même temps évolue dans une ambiance d'industrie et maintienne une collaboration intime avec les ingénieurs d'atelier.

1° D'un organisme de ce genre, il existe bien des exemples aux Etats-Unis : le Mellon Institute en est le type.

En France, dans notre domaine électrique, les services qu'a rendus le Laboratoire Central éclatent aux yeux; sa formule toutefois le place déjà aux confins de ma définition. J'ai, pour ma part, fondé la Société

---

(1) Communication présentée à la séance du 6 juillet 1927, de la Société Française des Electriciens.

Digitized by Google

de Recherches et de Perfectionnements industriels, et c'est évidemment en pensant à elle et en m'appuyant sur une expérience de près de dix années que je puis exprimer quelques idées sur le sujet de notre actuelle délibération.

2° Un organisme central, ai-je dit. Que gagne-t-on donc à extraire certaines recherches de l'atelier et à les transférer dans un laboratoire de ce genre ? Quelquefois rien; c'est une question d'espèces. Mais dans certains cas, qu'il importera de savoir reconnaître, on y gagnera d'expérimenter à une échelle plus propice. Le choix de l'échelle, c'est, à mon sens, une détermination qui, au début d'une recherche, demande réflexion. Qu'on la prenne trop petite, voilà de graves surprises à craindre, quand on passera à l'application industrielle; mais si on l'adopte trop grande, on n'ira pas loin, arrêté qu'on sera par l'excès des dépenses.

Pour l'imprégnation des bois, la Ville de Paris possède une belle usine et dispose des ingénieurs les plus compétents; quand, il y a quelques années, elle a voulu perfectionner ses méthodes de conservation et les amener au même degré de perfection qu'à Londres, ses premières expériences furent faites à l'usine même, sur des huiles importées d'Angleterre. Comme le résultat cherché n'avait pas été obtenu, la Ville de Paris s'est adressée à la Société de Recherches et de Perfectionnements Industriels et, là, c'est dans un autoclave contenant environ quarante morceaux de bois, chacun de la dimension d'un pavé, que les essais furent poursuivis. Ce chiffre de quarante permettait de travailler dans des conditions économiques; en même temps, il était assez grand pour parer aux anomalies dues à l'hétérogénéité de la matière. On eût risqué, à une échelle plus petite, d'attribuer à des différences de méthode les variations dues en réalité aux dissemblances que les morceaux de bois présentent toujours entre eux. Si le succès fut complet, c'est qu'en transportant cette recherche en dehors de son usine, la Ville de Paris ne diminua en rien l'influence si utile de ses ingénieurs et que ceux-ci, dans un laboratoire comme celui que j'ai défini, purent orienter les travaux selon leur expérience pratique; en même temps, on profitait d'un matériel à l'échelle voulue ainsi que de méthodes de contrôle absolument scientifiques.

3° Un autre avantage de la solution mixte que je préconise, nous allons le trouver à propos de la documentation. Cette assertion peut paraître paradoxale, car on pensera que l'ingénieur d'atelier connaît

Digitized by Google

sa spécialité mieux que tout autre. Mais précisément, cette compétence spéciale a parfois été acquise, — c'est bien naturel, — en se concentrant sur un étroit terrain hors duquel l'ingénieur d'atelier n'a pas eu beaucoup le temps de lever les yeux. Or, il y a bien des perfectionnements à faire naître en survolant les frontières. Je ne vise pas seulement ici les frontières géographiques, ce serait un lieu commun que de dire combien il est fructueux de se tenir au courant du mouvement des idées de l'étranger; non, je veux parler des lignes de démarcation toutes virtuelles entre les diverses industries. En transportant un principe, une idée, d'une branche à une autre, il survient qu'on puisse donner une solution aisée à un problème que des spécialistes, trop limités dans leur horizon, jugeaient ardu. C'est à ce point de vue que l'avantage d'un organisme central apparaît avec le plus d'évidence. En pensant à la Société de Recherches et de Perfectionnements Industriels, j'ai dans l'esprit l'exemple d'une connexité frappante entre la purification des houilles cendreuses et le revêtement bitumineux des chaussées. Est-il vraisemblable que cette association fut venue à l'esprit d'un ingénieur chargé exclusivement de conduire des lavoirs de charbon ? Non. Elle est, au contraire, naturelle et spontanée au sein d'un laboratoire qui centralise des études afférentes à des industries diverses, et elle est pour lui une cause toute particulière de fécondité.

4° J'en viens à la méthode qui doit être suivie dans un laboratoire de cette sorte, et aux différences que M. Darmois a caractérisées entre la méthode des laboratoires de science pure et celle de l'industrie. Ces différences doivent être mieux en lumière que partout ailleurs, dans un laboratoire où les problèmes ne sont abordés qu'en vue de leurs applications.

S'il est vrai que la méthode scientifique reste immuable dans son principe, il faut convenir qu'il intervient ici un facteur nouveau : le temps, et qu'il exerce une influence profonde, plus grande que beaucoup ne croient. Une invention industrielle ne vaut rien, si elle vient trop tôt ou trop tard : il serait mieux qu'elle fût imparfaite que de ne pas éclore à point nommé. Mais l'époque où commence une étude est elle aussi, en dehors de la volonté du chercheur : ce sont l'évolution de l'industrie et la concurrence qui la déclanchent; le souci d'être économe intervient pour retarder jusqu'à l'ultime instant ce démarrage. Le départ et l'arrivée étant imposés, la vitesse d'invention joue son rôle. Le chercheur qui ne travaille que pour l'industrie, s'écarte de l'analyse méthodique qui, patiente, fait varier chaque facteur l'un

Digitized by Google

après l'autre, dans l'ordre de succession qui lui plaît. L'inventeur industriel dont j'essaie de fixer ici un trait, est pressé : il restreint le degré de liberté de ses recherches, élimine à son gré arbitraire des parties d'étude qu'il décrète divergentes et, au lieu de couvrir méthodiquement tout le champ des possibilités d'investigation, il suit des directions privilégiées qui, souvent, ne se révèlent à lui comme telles que par un travail subconscient. Avec un tempérament qui s'apparente, si j'ose dire, quelque peu à celui du joueur, il pressent qu'il faut prendre une voie plutôt que la voisine. A ce jeu, il court le risque de se tromper et on l'accuse alors de ne pas avoir été assez méthodique; mais il court aussi la chance d'aller au but plus vite, avantage pour lui primordial. C'est ce souci de la vitesse qui me semble caractéristique de la recherche industrielle et étranger à la recherche scientifique, dont il la différencie avec netteté. Car il existe des hommes du plus haut savoir et de merveilleux expérimentateurs qui n'ont pas, tant s'en faut, cette faculté de sentir les possibilités en fonction du temps et de les saisir. N'arrivons-nous pas ainsi à définir un trait spécial de l'inventeur industriel ? le don d'orienter son élan et le talent de limiter ses sauts pour y mieux ramasser ses forces.

Il y aurait sur cette distinction psychologique un intéressant débat à ouvrir. Il est douteux que tous s'y trouvent d'accord, mais, parmi les inventeurs industriels qui ont connu le succès, il s'en rencontrera, à coup sûr, que cette thèse ralliera. Ce que j'en ai dit montre en tout cas l'esprit dans lequel la Société de Recherches et de Perfectionnements industriels conduit ses travaux et fait voir, je l'espère, l'utilité d'une telle institution.

Digitized by Google

CONCLUSION DE LA DISCUSSION

par M. Ch. Fabry, *Président.*

Je remercie les auteurs des très intéressants exposés que nous venons d'entendre, et je remercie tout particulièrement M. Maurice Leblanc d'avoir pris l'initiative de cette discussion sur un sujet d'importance capitale.

L'heure étant très avancée, il est à craindre qu'une conversation ne puisse pas s'engager ce soir. Je demande cependant la permission de vous retenir encore quelques instants pour résumer mes propres impressions.

J'ai été vivement intéressé par les remarques de M. Darmois sur la similitude de *méthode* entre la recherche industrielle et la recherche purement scientifique. Je dirais volontiers qu'entre les deux espèces de recherches existe seulement une différence dans la manière dont les sujets d'études sont choisis. Dans un laboratoire de pure science, chacun est maître du choix des sujets étudiés; si un sujet *ne rend pas*, on est toujours libre de l'abandonner et d'en choisir un autre. Comme le remarquait M. Darmois, il arrive souvent que l'on part pour essayer d'élucider une certaine question et qu'en route on dévie dans une toute autre direction. Il en est tout autrement dans le laboratoire de recherches industrielles; les sujets d'études y sont posés de l'extérieur, et les questions posées doivent être résolues, si le laboratoire ne veut pas causer de déception à ceux qui font les frais de son entretien.

Ceci m'amène à dire quelques mots du laboratoire organisé par la General Electric Company à Schenectady, laboratoire dont M. Duclert nous a parlé avec un enthousiasme que je partage entièrement. J'ai eu, à plusieurs reprises, l'occasion d'y passer quelques journées, qui comptent parmi les plus intéressantes et, j'ajouterai, parmi les plus agréables de mon existence; je m'associe entièrement aux phrases admiratives que vous avez entendues. Mais je veux faire remarquer, en me reportant à la définition que je viens de donner du laboratoire industriel, que le laboratoire de Schenectady est, pour une bonne part, non pas un laboratoire industriel, mais un laboratoire de recherches scientifiques. Sans doute, on y a résolu des problèmes qui étaient posés

Digitized by Google

par la pratique industrielle, mais on y a travaillé surtout des questions purement scientifiques, comme on l'aurait fait dans un laboratoire de recherches. La seule particularité de ce laboratoire de recherches est, qu'ayant derrière lui la plus importante firme industrielle du monde, il dispose de ressources que l'on ne trouve nulle part ailleurs, et que d'autre part cette firme est toute prête à utiliser ce qu'il peut y avoir d'utilisable dans le résultat des recherches. Je ne puis croire, par exemple, que les recherches de LANGMUIR sur le perfectionnement des méthodes pour faire le vide et sur la décharge à travers les gaz, de COOLIDGE sur les tubes à rayons cathodiques de grande puissance, et beaucoup d'autres, aient eu comme origine des problèmes directement posés par les techniciens. Je me rappelle, lors de mon premier passage à Schenectady, mon étonnement en voyant poursuivre des recherches sur des questions n'ayant aucun intérêt pratique immédiat, et comme je demandais au Dr WHITNEY quel intérêt sa Compagnie pouvait avoir à faire des frais pour de telles recherches, il me répondit à peu près ceci : « Les dépenses faites au laboratoire finissent toujours par être productives; on peut faire des recherches sur n'importe quoi; si elles sont bien faites, cela paye toujours ».

Mais on voit que, dans ce cas, les problèmes, au moins certains problèmes, ne vont pas de l'usine au laboratoire pour retourner résolus à l'usine; ils prennent directement naissance au laboratoire pour aller à l'usine.

On vous a parlé des énormes ressources financières dont dispose ce laboratoire. Est-il besoin de dire qu'il est impossible de voir l'exemple américain suivi en France, au moins à la même échelle. Si de telles sommes peuvent être mises à la disposition d'un seul laboratoire, c'est à cause de l'extrême concentration de l'industrie électrique aux Etats-Unis, où cette industrie se trouve presque entre les mains d'une unique compagnie. Chacun sait que, chez nous, la situation est exactement l'inverse. Est-ce un bien ou un mal ? Pour ma part, je n'en sais rien, mais c'est un fait, et ce fait doit être pris comme l'une des données du problème, donnée peut-être modifiable, mais en tous cas très lentement. Les choses étant comme elles sont, il est bien évident qu'aucune firme française ne peut s'offrir le luxe d'un laboratoire analogue, même de très loin, à celui de Schenectady.

Et alors apparaît d'une manière évidente la nécessité, pour nos industriels, de s'entr'aider en faisant vivre largement un laboratoire central entretenu à frais communs. Cet organisme, les américains pourraient, à la rigueur, s'en passer; il existe cependant chez eux, et

Digitized by Google

c'est le magnifique « Bureau of Standards »; chacun sait quels beaux travaux on y fait et quels bénéfices l'industrie américaine en retire. Il existe aussi chez nous, et c'est notre Société qui l'a fondé; notre Laboratoire central d'électricité a rendu et rend encore les plus grands services à notre industrie électrique. Mais il pourrait en rendre de beaucoup plus grands encore s'il était plus largement doté, s'il était installé dans un local plus vaste, si le personnel technique, d'une si remarquable qualité, était également remarquable par la quantité. La reconstruction de notre Ecole d'électricité va être terminée; avant peu de mois, notre grand établissement d'enseignement sera installé dans un local digne de lui. Mais dès qu'un effort est terminé il faut préparer le suivant; le prochain effort de notre Société devra, à mon avis, avoir pour objet l'amélioration matérielle du laboratoire central, dont plusieurs des orateurs de ce soir nous ont rappelé le rôle. Je suis certain que les industriels tiendront à honneur d'aider au développement de ce laboratoire qui leur a déjà rendu tant de services. C'est sur cet espoir que je veux clore les quelques observations que je désirais vous présenter.

Digitized by Google

NOTE
SUR LE BLOCK-AUTOMATIQUE BEAUMONT-CREIL

Rédigée pour la visite de la Société Française des Electriciens le 9 juillet 1922

par M. DEBIONNE

Ingénieur en chef adjoint des services électriques de la Compagnie des Chemins de fer du Nord.

Le block automatique en service sur le Réseau du Nord depuis le mois d'avril 1923, est installé sur la partie de ligne comprise entre Persan-Beaumont et Creil.

Principes de l'installation.

Cette partie de ligne est divisée en sections de block de 800 à 1 100 m de longueur. Chaque section comporte un sémaphore et, à 800 m de celui-ci, le signal qui l'annonce (palette Sem).

Ce block est du type à piles.

Les signaux sont commandés par moteurs fonctionnant sous 10 V environ.

Le temps d'ouverture est d'environ 3 secondes.

Les relais des circuits de voie ont une résistance de 4 ohms. Ils sont alimentés par une batterie de piles composée de 2 ou 3 batteries de 2 éléments au chlorhydrate d'ammoniaque. Les éléments, d'une force électromotrice de 1,4 V, sont branchés en série sur une résistance de 1 à 2 ohms, selon les cas, pour le moment du court-circuit. Leur capacité est d'environ 1 000 Ah.

La tension normale aux bornes des relais est de 0,9 V.

Les autres relais utilisés sur le block automatique, du même type que les relais de voie, ont une résistance de 400 ohms.

Tous les signaux se mettent à l'arrêt automatiquement au passage des trains, et ils ne peuvent revenir à voie libre :

S'il s'agit d'un sémaphore, qu'autant que la section qu'il couvre est libérée et que la palette et le sémaphore suivants se sont eux-mêmes mis à l'arrêt.

Digitized by Google

S'il s'agit d'une palette Sem, qu'autant que la portion de voie qui la sépare du sémaphore qu'elle annonce est dégagée et que ce dernier est lui-même revenu à voie libre.

C'est ce qu'on appelle la dépendance des sections.

Détonateur.

L'indication donnée par le sémaphore est appuyée par un détonateur. Cet appareil, qui renferme 20 cartouches sur barillet, est mis en action par le passage du premier essieu sur une pédale, chaque fois que le sémaphore est indûment franchi à l'arrêt.

Un chronographe enregistre la date et l'heure de la percussion de chaque cartouche.

Le franchissement d'un sémaphore à l'arrêt pouvant être autorisé moyennant certaines précautions, tous les postes de block sont munis d'un appareil spécial dit « boîte à bulletins ».

Chaque fois qu'un mouvement peut pénétrer dans une section bloquée, le chef du train remet un bulletin de pénétration au mécanicien. Le double de ce bulletin doit être placé dans la boîte à bulletins.

L'ouverture de cette boîte est masquée par un volet qui s'ouvre par la manœuvre d'un bouton. La manœuvre du bouton a en outre pour effet d'annuler pour une fois seulement le détonateur, à la condition que l'action se produise lors de la présence d'un train. Après le passage du mouvement, le détonateur est de nouveau prêt à fonctionner.

Protection des gares.

Les gares sont encadrées par deux sémaphores.

Dans chaque gare, il existe :

1° Deux voyants indicateurs par direction. L'un porte l'inscription « train annoncé » et l'autre « voie occupée ». La première inscription apparaît lorsque le train franchit le sémaphore précédent celui d'entrée de gare, la deuxième lorsque le train franchit le sémaphore d'entrée. L'indication de ces voyants est appuyée par une sonnerie. Les voyants s'effacent automatiquement au fur et à mesure que le mouvement s'éloigne.

2° Une serure électromécanique, dont le rôle est de ne permettre les manœuvres en gare que sous le couvert des signaux fermés.

Quand une manœuvre doit être effectuée, l'agent responsable agit sur une manette correspondant à la voie principale intéressée et met

Digitized by Google

à l'arrêt la grande aile d'entrée de gare ainsi que son signal annonciateur; il fait en outre apparaître, au droit du sémaphore d'entrée, un voyant portant l'inscription « on manœuvre ». Ce voyant est destiné à renseigner le chef de train qui surviendrait, sur la cause de fermeture du sémaphore.

Ce n'est qu'autant que les signaux sont dûment à l'arrêt qu'on peut achever la manœuvre de cette manette et dégager les clés de serrures Bouré, nécessaires à la manœuvre des aiguilles.

L'absence des clés de la serrure électro-mécanique empêche la manœuvre de la manette; celle-ci ne peut donc être ramenée dans la position permettant l'ouverture des signaux commandant l'entrée de la gare, que lorsque l'état des voies est redevenu normal.

Eclairage des signaux.

Les signaux du block automatique sont éclairés par des becs à acétylène alimentés par des bouteilles de gaz comprimé placées au pied de chaque signal. L'acétylène est dissous dans l'acétone.

Les sémaphores sont munis d'un feu fixe (bec de 2 litres 1/2).

Les palettes, d'un feu clignotant (bec de 5 litres, occultation de 8/10 à la fréquence 75).

Les bouteilles sont chargées à une pression de 12 à 14 kg/cm^2; on les remplace lorsque la pression est tombée à 1 kg/cm^2.

La contenance des bouteilles est de 1 600 l environ ce qui assure l'éclairage des sémaphores pendant 26 jours et celui des palettes Sem pendant 50 jours environ.

Digitized by Google

INFORMATIONS
DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

INAUGURATION
DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ

Le jeudi 10 novembre 1927, les nouveaux bâtiments de l'Ecole Supérieure d'Electricité, 12, rue Pierre Larousse, à Malakoff, ont été inaugurés par M. Doumergue, Président de la République, M. Herriot, Ministre de l'Instruction Publique, et M. Painlevé, Ministre de la Guerre.

M. le Président de la République a été reçu à l'entrée de l'Ecole par MM. les Ministres, M. Fabry, Membre de l'Institut, Président de la Société Française des Electriciens, M. Rey, Président du Conseil de Perfectionnement de l'Ecole Supérieure d'Electricité, M. Geoffroy, Président de la Société pour favoriser le développement du Haut Enseignement de l'Electrotechnique en France, M. Janet, Membre de l'Institut, Directeur de l'Ecole Supérieure d'Electricité.

Il gagna ensuite le grand amphithéâtre, où prirent place, à ses côtés, le Maréchal Foch, MM. les représentants du corps diplomatique, M. Delsol, Président du Conseil Municipal, une délégation de l'Académie des Sciences, M. Vladimir List, délégué des écoles techniques tchèques et de nombreuses autres personnalités.

M. Fabry rappela l'œuvre accomplie par la Société qui fonda, en 1896, après le Laboratoire Central d'Electricité, l'Ecole supérieure d'Electricité.

M. Janet remercia, les architectes, MM. Papet et Appia qui, aidés des conseils éclairés de M. Nénot, Membre de l'Institut, architecte des Beaux-Arts, édifièrent l'Ecole, le Personnel dirigeant de l'Ecole MM. Guilbert, Lange et Jouvion, dont le constant dévouement permit de mener l'œuvre à bien.

M. Rey, Président du Conseil de Perfectionnement, indiqua que l'Ecole une fois terminée, il restait nécessaire de réunir encore des sommes considérables pour la munir de tout le matériel nécessaire au travail des élèves.

Digitized by Google

M. Geoffroy résuma l'histoire de la création et du développement de l'Ecole et remercia les pouvoirs publics de l'appui qu'il avait rencontré auprès d'eux.

M. Iglésis, Président de l'Association amicale des anciens élèves évoqua pieusement le souvenir de ceux qui sont tombés au cours de la grande guerre et dont le glorieux sacrifice a mérité à leur Ecole la croix de guerre et la citation dont il allait être donné lecture.

M. Herriot félicita les orateurs de l'œuvre qu'ils avaient accomplie et salua dans cette inauguration, suivant de si près celle de la Maison des Centraux, de la Maison de la Chimie, de l'Institut d'Optique, une nouvelle et puissante raison d'envisager l'avenir de la France avec optimisme.

Puis M. Doumergue remit à M. Janet, aux applaudissement de ses nombreux amis, de ses collaborateurs et de ses élèves, la cravate de Commandeur de la Légion d'Honneur.

La cérémonie se termina par la remise de la Croix de guerre à l'Ecole Supérieure. M. le Ministre de la Guerre après avoir lu la citation qui la conférait, en remit l'insigne à M. Iglésis.

Monsieur le Président de la République procéda ensuite à la visite de l'Ecole et apposa sa signature sur le Livre d'Or.

Cette fête émouvante se déroula sous un soleil radieux en qui les fondateurs de l'Ecole voulurent voir un présage de ses nouvelles destinées.

Visite aux installations de la Compagnie du Chemin de fer du Nord.

Le 9 juillet 1927, un Groupe de Membres de la Société étaient accueillis sur le quai de la gare par MM. Moutier, Ingénieur en Chef des Services techniques de la Cie des chemins de fer du Nord, Debionne, Ingénieur en Chef adjoint des Services électriques, Duperron, Ingénieur chargé des essais et réceptions, Pefferkorn, Ingénieur adjoint au service central, Landrin, Chef des Ateliers principal.

A Creil, un train spécial leur faisait parcourir au ralenti la voie Beaumont-Creil équipée du block automatique, de manière à ce qu'ils puissent se rendre un compte exact du fonctionnement des appareils.

De retour à Creil, ils visitèrent, sous la direction de M. Roiron, Ingénieur adjoint du service de la signalisation, la cabine de Creil, à commande électrique des aiguilles.

Au cours de cette très intéressante visite, tous ces Messieurs nous prodiguèrent les explications avec une inlassable complaisance.

Digitized by Google

Qu'ils veuillent bien trouver ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

M. Debionne a bien voulu, d'autre part, rédiger, sur le système de signalisation la note insérée au présent Bulletin, p. .

c) Visite à l'Exposition de T. S. F.

Le 9 novembre 1927, un certain nombre de membres du Comité et de la 5e Section, gracieusement invités par le Syndicat des industries radioélectriques, visitèrent, au Grand Palais, l'exposition de T. S. F. que ce Syndicat avait organisée.

Reçus à l'entrée par nos collègues MM. Le Las, Vice président du Syndicat et Magunna, ils parcoururent sous leur direction, les stands des hauts parleurs de M. Le Las, du périscope Carpentier, des appareils de télévision Belin, que M. Belin voulut bien faire fonctionner lui-même devant les visiteurs, de M. Ducretet, du Matériel Téléphonique, des hauts-parleurs Gaumont de M. Hurm, dont les réalisations si ingénieuses émerveillèrent les visiteurs de M. Pathé de Radiola, de Radiola LL d'Hervoz.

Et ils terminèrent leur visite en parcourant le très intéressant salon nautique. Nous adressons ici, nos félicitations aux organisateurs de cette très intéressante exposition, et aux très aimables propriétaires des stands, auxquels nous sommes tout particulièrement reconnaissants des explications détaillées qu'ils ont bien voulu nous fournir.

d) Conférence du Comité consultatif International des communications téléphoniques à grande distance.

Le Comité Consultatif International des Communications Téléphoniques à grande distance a discuté les 5-6-7 et 8 septembre, dans les réunions tenues à Côme sous la présidence de M. le Professeur Breisig, « les questions concernant la protection des câbles téléphoniques contre la corrosion due à l'électrolyse et aux actions chimiques ».

Le travail du Comité a eu comme résultat l'émission d'un certain nombre « d'avis » et de deux projets de texte de directives concernant :

Le premier, les mesures à prendre pour la protection des câbles contre la corrosion électrolytique;

Le second, les mesures à prendre pour la protection des câbles contre les actions chimiques.

Les avis émis portent principalement sur la nécessité de publier cer-

Digitized by Google

tains renseignements susceptibles d'aider les différentes administrations à combattre les effets de l'électrolyse et d'établir une collaboration étroite entre le Comité Consultatif et les Organismes Internationaux représentant officiellement les divers intérêts en jeu, comme l'Union Internationale des Tramways et Voies ferrées d'Intérêt local et l'Union Internationale des chemins de fer.

Le projet de directives concernant les mesures à prendre contre la corrosion électrolytique, inspiré surtout par la réglementation suisse, semble devoir être assez profondément remanié, notamment pour le mettre en harmonie avec l'arrêté du 23 juillet 1927, relatif aux conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique.

Les dispositions du projet de directives ne s'appliquent, ni aux voies ferrées à plate-forme indépendante lorsque celle-ci est très isolée du sol, ni aux lignes de chemin de fer d'intérêt général, les connaissances actuelles sur la question ne permettant pas encore de préciser pour l'instant les règles qui seraient applicables à ces lignes.

Au projet de directives est jointe une série d'annexes techniques relatives :

L'annexe I. — Au principe de la méthode à suivre pour calculer la répartition des courants de retour dans un réseau de tramways.

L'annexe II. — Aux méthodes de mesures électriques concernant la corrosion électrolytique.

Le projet de directives concernant les mesures à prendre contre la corrosion due aux actions chimiques est assez sommaire et il fait ressortir l'incertitude dans laquelle nous sommes encore sur les avantages respectifs au point de vue de la durée des enveloppes en plomb pur ou en plomb renfermant 1 pour cent d'antimoine ou 1 à 3 pour cent d'étain.

A ce projet de directives est jointe une annexe relative aux méthodes permettant de différencier la corrosion chimique de la corrosion électrolytique.

Digitized by Google

TRAVAUX DES GROUPES

Groupe Sud-Est. — En avril 1927, M. Thovert, Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon a fait, dans cette ville, au Groupe Sud-Est de notre Société, une conférence sur la *Photométrie et la colorimétrie de l'éclairage.* Il rappela d'abord les difficultés inhérentes à la photométrie hétérochrome résultant surtout du caractère objectif des mesures qu'elle implique; il reproduisit la courbe des luminosités relatives pour chaque radiation spectrale, courbe relevée par Gibson et Tyndall; il rappela que G. Priest a défini la lumière du jour comme étant le rayonnement du corps noir à 5 200°C. Après avoir fait remarquer que la double détermination, en intensité et en nature, des couleurs le long du spectre, nécessite un appareillage compliqué et repose sur des observations purement subjectives, il rappela la possibilité de fonder une colorimétrie pratique sur l'analyse trichrome des couleurs; possibilité qu'il a lui-même utilisée en 1909 au moyen de son oculaire trichrome (J. Thovert, Spectrophotomètres et photométrie des sources colorées, *Journal de Physique*, t. VIII, 4e série 1909). Il termina en rappelant que la plaque autochrome lumière, qui comprend une couche de grains de fécule colorés en rouge vert et bleu, constitue un appareillage trichrome particulièrement simple et peut être munie d'un filtre compensateur, employé comme écran récepteur dans un photomètre, celui de Foucault par exemple. Un écran neutre graduant l'éclairement suivant une loi connue étant interposé, l'émulsion enregistrera, par le noircissement dégradé de deux bandes contiguës, l'action des deux sources comparées. En observant au travers de filtres colorés comme les grains de fécule, on pourra, par glissement, égaliser les parties monochromes également noircies des deux bandes. Le décalage ainsi effectué à partir de leur position primitive, traduit les rapports d'intensités : la triple observation de cet unique enregistrement photographique donnera les trois valeurs colorimétriques et, par suite, les éléments de calcul de la luminosité totale.

Digitized by Google

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ [1]

PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ.

Schémas et règles pratiques de bobinage des machines électriques, par F. TORICES, Ingénieur-Electricien, ancien professeur à l'Ecole industrielle de Valladolid, et Ad. CURCHOD, Ingénieur-Electricien (E. S. E.). — Troisième édition, revue et augmentée. — Paris, Dunod, 1927; un vol. broché $21^{cm} \times 14^{cm}$, de 165 pages, avec 16 figures et 54 planches. [Prix : 18 francs] (Don de l'éditeur).

Chaudières et Condenseurs, par le Colonel F. CORDIER, chef des Travaux pratiques de Physique à l'Ecole Polytechnique, Ingénieur-Electricien I. E. G. — Deuxième édition, corrigée et augmentée. — Paris, Gaston Doin et Cie, 1927; un vol. broché $24^{cm} \times 16^{cm}$, de 659 pages, avec 321 figures dans le texte. [Prix : 70 francs net]. (Don de l'auteur).

Utilisation rationnelle des Combustibles. Distillation des combustibles à basse température, par R COURAU, Administrateur, Directeur général des Mines de la Houve, et Henri BESSON, Ingénieur-Conseil. — Paris, Gaston Doin et Cie, éditeurs, 1928; un vol broché $24^{cm} \times 15^{cm}$, de XV-356 pages, avec 75 figures dans le texte. [Prix : 40 francs]. (Don des éditeurs).

La mesure des débits et l'aménagement des usines hydrauliques, par E MONTAGNÉ, Ingénieur, ancien élève de l'Institut Polytechnique de Grenoble, avec la collaboration et une préface de L. BARBILLION, Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Polytechnique, Paris, Albin Michel, 1927; un vol. broché $25^{cm} \times 16^{cm}$, de II-201 pages, avec 118 figures. (« *Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien Mécanicien* »). [Prix : 20 francs]. (Don de l'éditeur).

Accumulateurs électriques, par F. CASTEX, Professeur à l'Institut Polytechnique de l'Université de Grenoble. Avec une préface de L. BARBILLION, Directeur de l'Institut Polytechnique. — Paris, Albin Michel [1927]; un vol. broché $25^{cm} \times 16^{cm}$, de 296 pages, avec 222 figures. (« *Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien-Mécanicien* »). [Prix : 30 francs]. (Don de l'éditeur).

CANALISATIONS. — APPAREILLAGE.

Traité pratique des Distributions et des Canalisations d'Electricité, d'Eau, de Vapeur et de Gaz, par E. PACORET, Ingénieur (A et M.), lauréat de sociétés savantes et industrielles. — H. Vial, éditeur, Dourdan et Paris 1927; 2 vol. brochés $25^{cm} \times 16^{cm}$, formant un tome de 763 pages avec figures. (Don de l'auteur et de l'éditeur).

Safety Rules for the installation and maintenance of Electrical supply and Communication Lines, comprising Part 2 of the fourth edition National Electrical Safety Code. — Handbook series of the Bureau of Standards, n° 10 — Washington, government Printing Office, 1927; un vol. broché $19^{cm} \times 12^{cm}$,

---

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société française des Electriciens, 14, rue de Staël, de 14 à 17 heures, tous les jours sauf le Dimanche.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Publication subventionnée par la Confédération des Sociétés scientifiques françaises à l'aide des fonds alloués par le Parlement.

Production et utilisation mécanique de l'électricité

Les Alternateurs industriels, par L. Barbillion et P. Bergeon. — Paris, Albin Michel, 1927 ; un vol. broché $26^{cm} \times 16{,}5^{cm}$ de 278 pages, avec 239 figures et 8 planches hors texte. (Don de l'Editeur). Prix 35 francs.

Bon ouvrage d'enseignement décrivant avec assez de détails la construction moderne des alternateurs aussi bien au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique, et expliquant de façon satisfaisante l'origine des phénomènes dont ils sont le siège. Le calcul des alternateurs n'est, par contre, traité que d'une façon assez sommaire. A signaler un chapitre assez intéressant au point de vue historique sur les alternateurs de modèles anciens.

Schémas et Règles pratiques de bobinages des machines électriques, par Torices et Curchod — 3e édition, revue et augmentée, Paris. Dunod 1927 un vol. broché $21^{cm} \times 14^{cm}$, 165 pages avec 16 figures et 54 planches. Prix : 18 francs. — (Don de l'éditeur).

Excellent petit ouvrage qui s'adresse aux nombreux électriciens ayant fréquemment à rebobiner des moteurs électriques. Il indique, sous une forme claire et pratique, la manière de faire les connexions des bobines entre elles, et de les réunir aux bornes de la machine, travail qui peut donner lieu à d'innombrables erreurs si l'ouvrier n'est pas guidé convenablement dans sa besogne. L'ouvrage commence par le rappel de quelques notions fondamentales sur l'électromagnétisme et les machines électriques. Le fait que ce livre en est à sa 3e édition, nous dispensera d'en faire un éloge plus complet.

Appareillage

Convertitori statici di corrente elettrica, par Giancarlo Vallauri, Directeur de l'Institut électrotechnique de l'Académie Navale Italiennne (Extrait de *l'Elettrolecnica* du 25 mars, 5 et 15 avril 1927), 1 fascicule $24^{cm} \times 32^{cm}$, 24 p. 41 fig.

C'est une étude concise et claire à la fois, d'une autorité en cette matière. Ce n'est pas une description détaillée mais bien un essai de coordination des principes sur lesquels se base le fonctionnement des appareils statiques de transformation du courant-continu en courant alternatif et inversement.

L'auteur appelle ces appareils « Convertisseurs » pour les distinguer, et il les subdivise en trois catégories distinctes, les « Redresseurs » qui transforment le courant alternatif en courant continu, les « Générateurs d'oscillations » qui transforment du courant continu en courant alternatif, et les « Multiplicateurs de fréquence » qui transforment le courant alternatif d'une fréquence à une autre.

L'auteur ramène la loi fondamentale qui régit le fonctionnement de ces appareils à la considération d'un élément de circuit présentant des « anomalies » par rapport aux éléments ordinairement utilisés.

Ces anomalies, quelle que soit leur origine physique, peuvent être analytiquement

Digitized by Google

déterminées par une fonction $\varphi(v, i, t) = 0$ qui lie la tension aux bornes, le courant et le temps, autre que celle qui conduit à la constance de la résistance des inducteurs ordinaires ; toutefois, cette fonction devient très compliquée, en particulier quand on veut tenir compte du phénomène d'hystérésis, et l'auteur se reporte alors à un diagramme plus facile à étudier appelé « caractéristique » du conducteur à anomalies. En partant de cette caractéristique, on détermine les conditions de la possibilité du fonctionnement que l'on désire avoir, et du rendement optimum.

Ces appareils statiques n'ont pas encore eu d'application pratique ailleurs qu'en radiotechnique, mais il se peut qu'ils entrent plus tard dans le domaine électromécanique et ce sera alors une modification radicale des systèmes existants. C'est une synthèse de leur théorie générale que l'auteur a composée.

Télégraphie. — Téléphonie. — Transmissions par ondes.

Aide Mémoire. — Formulaire de la T. S. F. — Théorie et pratique, par E. Pacoret, Ingénieur électricien A. et M. Edition 1926. – Paris, Librairie scientifique Albert Blanchard, 1926, un vol. relié toile $18^{cm} \times 14^{cm}$, de 517 pages avec 255 figures (Don de l'Éditeur).

L'Auteur résume dans un exposé très condensé, et très précis, tout ce dont on peut avoir besoin dans l'étude de la T S.F.

Après un historique bref et très net de la radioélectricité, il donne un tableau des principaux symboles utilisés dans les schémas.

Ce tableau restreint expose les divers types de bobinages (nid d'abeille et fond de panier), de condensateurs, les fiches et jacks qui sont utilisés dans les schémas des divers pays.

Dans la deuxième partie, l'auteur parle des principes fondamentaux relatifs au courant alternatif, et s'étend en particulier sur l'inductance et la self-inductance.

Le chapitre 3 traite de la propagation des ondes électriques, de leur nature, ainsi que des oscillations, et passe en revue les principaux montages utilisés dans la pratique, tant par les techniciens que par les amateurs.

Le chapitre 4 sur les « Appareils collecteurs d'ondes », étudie les antennes et les cadres, donne des renseignements pratiques sur les récepteurs : détecteurs, piles, accumulateurs, redresseurs, condensateurs, transformateurs, haut-parleurs, puis sur les émetteurs-alternateurs, à haute fréquence, éclateurs, oscillateurs à lampes triodes, modulateurs, microphones.

Dans le chapitre 6, d'une vingtaine de pages, sont résumées les applications actuelles de la radiophonie.

Le chapitre 7 traite de la radiotélégraphie proprement dite, du poste émetteur au poste récepteur à lampes.

Le chapitre 8 résume les applications de la radiotélégraphie : postes à ondes amorties, T P.S., apppareil émetteur, T P.A.

Le chapitre 9 expose les diverses méthodes employées pour les mesures de résistance, capacité, self-inductance, longueur d'ondes, et décrit les ondemètres des divers modèles.

Les chapitres 10, 11, 12 et 13, traitent des stations émettrices, des réseaux français et coloniaux, des signaux horaires, des principales stations mondiales, des postes de radiodiffusion, français et étrangers, des principes généraux de télémécanique, des appareils de Belin et de Freund.

Une annexe fournit les adresses des Sociétés d'amateurs, Syndicats et réglementations de la T.S.F. avec les décrets et arrêtés de 1917 à nos jours.

Cet aide mémoire, marque le premier pas dans un travail d'ensemble sur la radioélectricité, et est de nature à rendre des services aux amateurs et aux professionnels de la T S.F.

Recherches physiques.

Influence de l'écrouissage et du recuit sur les propriétés magnétiques des minces fils d'invar, de fer et d'acier, par Mme G. Biéler-Butticaz, 18×25^{cm}, 20 p.. 4 figures. Extrait des Archives des Sciences physiques et naturelles Albert Kundig, Genève.

Dans ce travail, qui fait suite à l'étude du frottement intérieur de minces fils d'invar aux températures élevées (Archives, 1925), l'auteur décrit la méthode

Digitized by Google

employée : mesure au magnétomètre de l'aimantation, avant et après recuit, en fonction de la température, de fils tirés à froid. Elle traduit en courbes les résultats obtenus et elle conclut : que le point de transformation ne semble pas déplacé par l'écrouissage, mais que l'écrouissage change la forme de la courbe d'aimantation ;

que la perte principale a lieu, pour l'invar, entre 200°C et 250°C, que le métal soit à l'état ordinaire, écroui ou recuit ;

elle relève les analogies que présentent les courbes d'aimantation avec celles qui représentent le frottement intérieur avec la température ;

elle constate l'existence d'une certaine anormalie vers 340°C, correspondant probablement au point de transformation du nickel en nickel non magnétique.

« Magnetochimica » par Ottavio Bonazzi, 1 vol 25 × 18^{cm}, 123 p. 32 fig. Tipographia éditrice G W. F. Mariotti. Pise, 10 lire.

Sous le nom de « chimie magnétique » l'auteur expose sommairement, mais avec une bibliographie complète, nos connaissances actuelles sur les relations entre les propriétés magnétiques et la constitution chimique des corps.

Il rappelle d'abord les définitions, les propriétés fondamentales, les méthodes de mesure des qualités magnétiques, la théorie de Langevin étendue par Weiss.

Il considère les qualités ferromagnétiques, paramagnétiques et diamagnétiques des corps simples, solides, liquides, gazeux, classés suivant le système périodique, les qualités magnétiques marquant nettement cette périodicité.

Il indique l'influence de la température, de la pression, de l'état de solution, sur les propriétés magnétiques et la loi de Curie de la constance du produit de la susceptibilité magnétique par la température absolue dans les corps paramagnétiques. Les corps ferromagnétiques et les alliages ternaires de Heusler (Mn-Cu-Al) fortement ferromagnétiques, retiennent particulièrement l'attention.

Un chapitre entier est consacré aux beaux résultats que M. Pascal a obtenus par l'étude magnétique des corps organiques ; ces derniers suivent avec une grande précision les lois mises en lumière par M. Pascal, et qui permettent de révéler la structure des composés organiques d'une façon plus sûre, quelquefois, que par n'importe quel autre moyen : elles permettent de reconnaître la position des éléments dans l'édifice moléculaire, elles sont particulièrement sensibles aux liaisons doubles, et quand l'étude chimique laisse indécise la formule à choisir parmi plusieurs constitutions également probables, ces lois magnétiques donnent des arguments sûrs pour le choix correct, ce qui fait d'elles un moyen puissant de recherches dans les mains d'un chimiste.

Il est enfin question du magnéton de Weiss, c'est-à-dire, du moment magnétique que ce dernier attribue aux aimants élémentaires de l'atome, les moments magnétiques atomiques de plusieurs corps soigneusement mesurés étant des multiples entiers du magnéton.

Annuaire

Annuaire Électrotechnique Tchécoslovaque 1927. — 324 pages, 297 × 210 mm, 120 fig., 50 tab., 6 cartes ; prix, relié : 160 couronnes tchécoslovaques = 130 francs ; édition Electrotechnicky Svaz ceskoslovensky (Association Electrotechnique Tchécoslovaque), Prague III. Cihelna 2.

Le second volume de l'Annuaire *Electrotechnique Tchécoslovaque* qui vient de paraître sous la direction de M. V. Ptacek, rédacteur de la revue électrotechnique tchécoslovaque *Elektrotechnicky Obzor*, contient des renseignements complets sur tout ce qui concerne l'électrotechnique en Tchécoslovaquie. Après des indications sur l'activité de l'Elektrotechnicky Svaz ceskoslovensky, on y trouve le texte de 10 règlements et normes électrotechniques nouvellement parues, la liste des représentants diplomatiques et des offices publics. Le mouvement des prix, des nombres indices, la valeur des importations et des exportations pendant l'année 1926 (import. : 210 millions de couronnes, export. : 50 millions) sont exposés par diagrammes ; on y trouve ensuite les tarifs officiels pour l'étalonnage des compteurs d'électricité ; une liste des brevets récents, le texte intégral des nouveaux décrets et lois concernant l'électrotechnique. La participation de l'Etat à l'électrification du pays est étudiée en trois articles (dont l'un de M. F. Kneidl, secrétaire du Comité Electrotechnique Tchécoslovaque). Les renseignements détaillés sur les écoles, parus dans

Digitized by Google

le premier volume, sont complétés par de nouvelles données et par des statistiques récentes; le nombre des étudiants inscrits dans les deux dernières années des quatre Ecoles Supérieures de l'Electricité, est actuellement de 1 260.

Les représentants d'importantes usines (Kolben, Skoda, etc.), passent en revue les conditions et tendances actuelles de l'industrie électrotechnique. La partie consacrée aux usines centrales commence par l'article de M. le professeur List, sur l'activité de 22 usines reconnues d'utilité publique (année 1925 : investissements totaux 1 100 millions de couronnes, bénéfices 74 millions de couronnes production totale 282 millions de kWh, longueur des lignes à haute tension 9 400 km.); vient ensuite une statistique détaillée des 417 usines centrales de production et de distribution d'énergie électrique. La production totale de ces usines a été, en 1925, de 1 300 millions de kWh, soit 96 kWh par habitant et correspond à un accroissement de 7 pour cent par an; la longueur totale des lignes à haute tension est de 13 500 km, marquant un accroissement de 18 pour cent par an. Quatre articles sont consacrés à l'électrification des chemins de fer qui commence à se développer. En ce qui concerne les communications à distance, on trouve des renseignements complets dans les articles sur les câbles téléphoniques à grande distance, sur les nouvelles centrales de téléphonie automatique à Prague et sur le développement de la radiophonie (avec tableaux détaillés des stations émettrices). La partie adresses, révisé, et complétée, contient 4 700 noms de communes électrifiées (avec des indications sur le nombre d'habitants, le système de courant, la tension et le prix de l'énergie), 1 000 adresses de petites sociétés s'occupant de la distribution et de la vente d'énergie à la campagne, et 2 500 adresses de différentes entreprises industrielles et commerciales.

Digitized by Google

IL Y A 30 ANS

I. — Assemblée générale extraordinaire du 10 Novembre 1897.

M. Mascart annonce que le Comité a décidé de proposer à l'Assemblée générale d'émettre parmi les membres de la Société française des électriciens, un emprunt de 60 000 fr. pour la construction et l'aménagement de l'Ecole Supérieure d'électricité.

L'Assemblée générale adopte cette proposition par 84 voix contre une.

II. — Réunion ordinaire mensuelle du 10 Novembre 1897.

M. Loppé, présente des photographies d'éclairs qui ont frappé la tour Eiffel dans la soirée du 31 mai.

M. Janet, expose les appareils exécutés par des élèves de l'Ecole supérieure d'électricité.

M. le Dr Foveau de Courmelles, décrit le matériel électrothérapique, établi par lui-même et par divers constructeurs.

III. — Extrait du Bulletin.

Le Bulletin continue l'exposé des méthodes et appareils employés au Laboratoire Central d'électricité.

IL Y A 60 ANS

Septembre 1867. — Mort de Faraday, né en 1794.

A la Société Royale de Londres, C. W. Siemens annonce que son frère le Dr Werner Siemens, de Berlin vient de réaliser une nouvelle machine magnéto-électrique dans laquelle l'aimant permanent en acier employé jusqu'alors est remplacé par un électro-aimant à âme de fer doux excité au démarrage par le courant d'une pile, puis par le courant redressé de l'armature. Cette machine est réversible et fonctionne en moteur si on alimente l'armature par une pile.

A la même séance, Wheastone décrit une machine du même type qui s'excite au démarrage par le magnétisme rémanent.

Le courant produit portait à l'incandescence un fil de platine de 10 cm de long et de 2 mm de diamètre.

Digitized by Google

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

COMPTES RENDUS DES RÉUNIONS :

Réunion ordinaire mensuelle du Samedi 3 Décembre, p. 1406.
Admissions de Membres titulaires, p. 1406.
Dons à l'Ecole, p. 1407.
Communications diverses, p. 1408.

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

Commandes à distance d'une embarcation par T. S. F. (M. CHAUVEAU), p. 1410. — Les accumulateurs électriques (M. JUMAU), p. 1430. — Note de M. FÉRY, p. 1446. — Réponse de M. JUMAU, p. 1448.

INFORMATIONS DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS :

Remise à M. JANET du produit de la souscription pour la création de secours d'études, p. 1449.

TRAVAUX DES SECTIONS :

Sommaire, p. 1450. — Texte, p. 1450.

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 1477.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS, p. 1479.

IL Y A TRENTE ANS, p. 1481.

TABLE DES MATIÈRES, p. 1482.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Digitized by Google

COMPTES RENDUS DES REUNIONS

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Samedi 3 Décembre 1927.

Présidence de M. Ch. FABRY.

La séance est ouverte à 16 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

Brillie (Jean), chef des Services techniques de la soudure autogène française, 94, avenue Victor-Hugo, Paris (16e). — Présenté par MM. Bethenod et Grosselin.

Bruel (Pierre), ingénieur en chef des Services à la société l'Electro-Câble, 151, rue Michel-Carré, Argenteuil (Seine). — Présenté par MM. Grosselin et Lemenand.

Cauchois (Louis), ingénieur en chef de l'Association Normande des propriétaires d'appareils à vapeur, 70, Rampe Bouvreuil, à Rouen (Seine-Inférieure). — Présenté par MM. Lorin et Grosselin.

Cazaubieilh (Maurice-Pierre-Antoine), sous-ingénieur à la C. P. D. E., 3, Villa Ornano, Paris (18e). — Présenté par MM. Imbs et Malégarie.

Compagnie des Chariots et Tracteurs « Automatic », représentée par son Directeur, M. Jacques Deschamps, 64, Chaussée d'Antin, à Paris (9e). — Présenté par MM. Lemay et Gosselet-Witz.

De Crécy (Hubert), administrateur délégué des Etablissements Hillairet, 93, rue Jouffroy, Paris (17e). — Présenté par MM. Jean Rey et Gaucharaud.

De Félice (Emile-Jacques), sous-ingénieur au Service technique central de la C. P. D. E., 86, rue Charles-Laffitte, Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. Imbs et Malégarie.

Granmasson (Jean), ingénieur à la C. P. D. E., 62, rue du Rocher, Paris (8e). — Présenté par MM. Imbs et Malégarie.

Matignon (Camille), professeur au Collège de France, 7, boulevard Carnot, Bourg-la-Reine (Seine). — Présenté par MM. Fabry et Chaumat.

Meunier (Henri-Louis), ingénieur en chef à la Société anonyme Siémens-France. — Présenté par MM. Fabry et Bunet.

Roussel (Charles-Antoine-Victor), ingénieur à la C. P. D. E., 212, rue de Vaugirard, Paris (15e). — Présenté par MM. Imbs et Malégarie.

Société d'applications des méthodes modernes d'éclairage électrique, 97, rue Compans, Paris (19e). — Présentée par MM. Bertin et Belmère.

Stiffel (Paul), ingénieur en chef du Génie maritime, Ministère de la Marine, 2, rue Royale, Paris (8e). — Présenté par MM. Eschwège et Leblanc.

Thaller (Edmond-Marie-Georges), directeur général de la Société Lyonnaise des Forces motrices du Rhône, 1, rue des Chartreux, Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Berne et Boutan.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des électriciens.

Digitized by Google

M. le Président rappelle que, à l'occasion de l'inauguration des nouveaux bâtiments de l'Ecole supérieure d'électricité et de la remise à M. JANET de la cravate de Commandeur de la Légion d'honneur, le Bureau et le Comité de la Société française des électriciens, les amis, les collaborateurs, les élèves et anciens élèves de M. JANET se proposaient de lui offrir un souvenir. M. JANET a eu l'extrême délicatesse de faire connaître au Président de la Société qu'il préférait voir utiliser à la création d'un secours d'études en faveur d'un de ses élèves, la somme qui aurait été affectée à ce souvenir. Une souscription fut donc ouverte qui atteignit en quelques jours près de 52.000 francs.

Le Président se félicite de ce succès, dû aux sentiments de vive sympathie et de profonde reconnaissance que M. JANET a toujours su éveiller autour de lui.

Il ajoute que si l'Ecole a pu être ouverte à la date fixée d'avance par M. JANET, c'est en grande partie grâce aux efforts soutenus avec autant d'intelligence que d'opiniâtreté par ses collaborateurs, MM. GUILBERT, sous-directeur, JOUVION, secrétaire, LANGE et André GUILBERT, chefs de travaux.

M. le Président est heureux de pouvoir les en remercier publiquement au nom de la Société.

Il signale que tout le matériel nécessaire à la formation des élèves n'a pu encore être acquis par l'école en raison de la hausse des prix, survenue au cours de la construction. Un nouvel effort est donc encore indispensable et il est demandé en ce moment tant aux souscripteurs de la première heure qu'à ceux qui, pour une raison quelconque, n'ont pas souscrit, jusqu'à présent, de le faire.

M. le Président rappelle que, aux termes de la loi sur l'apprentissage, une partie de la taxe annuelle sur les salaires peut être consacrée, jusqu'à une proportion maxima qui atteint 25 pour cent dans l'industrie électrique, à l'enseignement technique supérieur et aux laboratoires. Par application de ces dispositions un appel a été adressé à tous les industriels électriciens de France pour leur demander de consacrer à une subvention au Laboratoire Central d'électricité, le dixième du montant de leur taxe. Au cas où un Comité départemental n'accepterait pas de déduire intégralement du montant de la taxe la somme ainsi affectée, l'industriel intéressé pourrait en appeler à la Commission permanente du Conseil supérieur de l'enseignement technique laquelle, d'après les assurances formelles données à la Société, prononcera cette déduction.

M. le Président adresse ses vifs remerciements aux Ateliers électri-

Digitized by Google

ques d'Oerlikon, qui ont bien voulu offrir à l'Ecole supérieure d'électricité, quatre commutatrices triphasées de 6 kW sous 200 V. continu et quatre transformateurs triphasés de 6 kVA, le tout ayant une valeur de 30.000 francs.

Il fait part du décès de MM. Goldsmith, ingénieur principal honoraire des Chemins de fer, et Tétaud, Ingénieur E.S.E., et adresse aux familles des disparus les condoléances de la Société.

Conformément à l'art. 14 du Règlement intérieur d'Administration, le Président fait connaître les noms que le Comité propose au choix de la Société pour son renouvellement partiel. Ces noms sont les suivants :

Président pour 1929 : M. Bunet.

Vice-Présidents pour les exercices 1928-1929-1930 : MM. Ch. Marie et Reynaud-Bonin.

Secrétaire général pour les exercices 1928-1929 : M. Darrieus.

Trésorier pour les exercices 1928-1929 : M. Meyer Marcel.

Secrétaires pour les exercices 1928-1929-1930 : MM. Collet et Waguet.

Membres pour les exercices 1928-1929-1930 : MM. Bacqueyrisse, Bethenod, Bossu, Cahen Henri, Carpentier, Chaumat, Chappuis, Daguerre, Delon, de la Gorce, Gosselin, Lemonnier, Mathivet, Stiffel, Thielemans, Toulon.

Commission des comptes : MM. Bachellery, Schwarberg et de Valbreuze.

M. Kéraly, chef du service force motrice aux aciéries de Dilling (Sarre), présente une communication sur l'épuration électrique des gaz de haut-fourneaux. Après avoir exposé les théories proposées pour expliquer le mécanisme de la précipitation des poussières, M. Kéraly projette les vues des installations réalisées dans la région et il indique quels sont les résultats obtenus.

M. le Président, en remerciant M. Kéraly de nous avoir initiés à une application nouvelle de l'électrotechnique, remarque que cette application soulève des problèmes intéressants pour les physiciens, notamment celui de la formation des gros ions, qui peut donner lieu à des études intéressantes.

M. Chauveau, ingénieur, chef de la Section de télémécanique de la S.F.R. fait une communication sur la commande à distance d'une embarcation par T.S.F. Il projette le schéma des appareils de com-

Digitized by Google

mande ainsi que diverses vues de la vedette sur laquelle il les a montés et qui atteint une vitesse de 70 km à l'heure. Il indique qu'elle peut être actionnée soit d'un avion par T.S.F., soit d'un cuirassé, étant reliée à celui-ci par un câble ayant jusqu'à 50 km de longueur.

Sur une question posée par le Président, M. CHAUVEAU indique que la vedette, complètement fermée et compartimentée, est insubmersible et se comporte à la mer comme une torpille flottante.

M. le Président félicite vivement M. G. CHAUVEAU d'avoir mené à bien une réalisation aussi difficile. Il exprime le vœu que la Société française des électriciens soit appelée au printemps prochain à voir évoluer une de ces vedettes.

La séance est levée à 19 heures

Digitized by Google

COMMANDE A DISTANCE D'UNE EMBARCATION PAR T. S. F. [1]

par M. CHAUVEAU

Ingénieur, Chef de la Section de Télémécanique de la S. F. R.

Je désire décrire ici une réalisation pratique d'un problème de télémécanique : la commande à distance par T.S.F. d'une embarcation rapide dont l'équipement a été réalisé sous notre direction par les ateliers de la S.F.R.

Les points noirs, dans une étude de télémécanique, sont les brouillages qu'on peut subdiviser en trois classes :

Brouillages involontaires ;
Parasites ;
Brouillages volontaires.

Les brouillages involontaires résultent des nombreuses émissions radiotélégraphiques ou radiotéléphoniques qui sillonnent l'atmosphère. Contre ceux-ci une première précaution consiste autant que possible à utiliser pour la télécommande une onde prise dans une gamme relativement peu employée pour les communications ordinaires ; malheureusement, ces gammes se font de plus en plus rares. Un autre procédé courant consiste à moduler l'onde émise, cette modulation peut se faire soit à haute fréquence, soit à basse fréquence ; on dispose alors à la réception un système résonant sur la fréquence de modulation.

Pour obtenir une émission modulée à haute fréquence, on intercalera par exemple, dans le circuit d'alimentation des lampes d'émission, un circuit accordé sur une onde de quelques milliers de mètres de longueur ; dans ces conditions, il est facile d'obtenir une onde porteuse d'émission modulée à quelques milliers de périodes par seconde : c'est le procédé que nous avons employé, sa réalisation est

(1) Communication présentée à la séance mensuelle de la Société française des Electriciens du samedi 3 décembre 1927.

Digitized by Google

facile et permet d'obtenir toute une gamme de fréquences de modulation par variation du circuit oscillant modulateur.

Pour se préserver des brouillages involontaires, on peut également employer une modulation à plus basse fréquence, quelques centaines de périodes par seconde, par exemple. Notre regretté collègue M. GUERITOT, avait, sur ce principe, réalisé tout un système de télémécanique extrêmement remarquable qui fut mis en application à Toulon par la Marine ; il commandait son émission par une série de lames vibrantes, chacune d'elles ayant une fréquence déterminée; la réception comprenait un jeu de lames vibrantes identiques : l'ensemble constituant une sorte de système télégraphique multiplex.

Pour éviter les parasites, on peut agir sur les récepteurs et également sur les sources de parasites quand elles sont accessibles. Les récepteurs seront montés en cage de Faraday et si besoin est, les différents étages d'amplifications seront séparés par écrans. Les parasites agissant généralement sur les étages de basse fréquence, il est préférable de ne pas employer ceux-ci dans les appareils récepteurs; à bord d'une embarcation dirigée par télémécanique, les sources de parasites sont nombreuses ; les magnétos des moteurs de propulsion, les moteurs électriques et les relais semblent se faire un malin plaisir d'apporter leur contribution à la réception. Les magnétos, les bougies et leurs canalisations seront mises en cage de Faraday, les moteurs électriques et les relais seront convenablement shuntés par des condensateurs. La protection contre les parasites peut être ainsi pratiquement obtenue d'une manière efficace.

Un procédé tout à fait convenable pour mettre le récepteur à l'abri des brouillages involontaires et des parasites a été réalisé par MM. DAVID et MESNY; il consiste en un émetteur spécial émettant continuellement une onde porteuse entretenue, cette onde étant modulée seulement au moment des signaux. Le récepteur est constitué par un système de super-réaction réglé de telle sorte qu'en l'absence de signaux, la réception de l'onde porteuse provoque la saturation de la lampe détectrice, d'où silence absolu. Tous les brouillages pouvant venir alors n'ont plus d'action sur cette détectrice puisqu'elle est saturée. Lors d'une commande, l'onde porteuse est modulée et le signal à la réception se détache sur un fond de silence complet. En un mot, c'est l'émission elle-même qui produit le verrouillage contre les brouillages. Ce dispositif a été utilisé avec succès pour divers problèmes de télémécanique, entre autres pour la commande par T.S.F. de machines à imprimer genre télétype.

Digitized by Google

Mais, en télémécanique de guerre, il faut faire intervenir un troisième facteur, le brouillage volontaire. En effet, l'ennemi ne restera pas inactif devant une attaque et il est probable qu'il s'efforcera, par tous les moyens, de brouiller les signaux de commande. Contre ces brouillages volontaires, je ne vois qu'un remède, non pas curatif, mais préventif si je puis m'exprimer ainsi : il faut faire le moins de signaux possible et faire ces signaux aussi brefs que possible.

Ainsi, l'ennemi ne pourra pas recevoir les signaux et sera mis tout au moins dans l'impossibilité d'en mesurer les caractéristiques. Par conséquent, il ne faut pas que le signal dure pendant tout le temps d'une manœuvre et encore bien moins qu'une onde porteuse soit émise continuellement entre les signaux, car alors l'ennemi aurait toute facilité pour déterminer les caractéristiques d'une onde permettant de réaliser un brouillage efficace.

Cependant, pour qu'une embarcation à grande vitesse puisse être commandée pour évoluer avec suffisamment de souplesse, il est indispensable de procéder à la commande suivant la méthode en deux temps que j'ai préconisée il y a une dizaine d'années : une manœuvre doit être d'abord préparée par un signal déterminé qui provoque en quelque sorte l'armement des différents organes concourant à cette manœuvre; puis elle est déclanchée ensuite, au moment opportun, par un second signal dit signal d'exécution pouvant être répété à volonté.

Ainsi le pilote commandant à distance sa vedette pourra préparer à l'avance une manœuvre « à droite », par exemple, par un signal déterminé ; puis, au moment précis où il jugera la commande nécessaire, le signal d'exécution sera lancé et provoquera immédiatement l'action du gouvernail ; celui-ci s'arrêtera quand le signal d'exécution cessera et se remettra en route si le signal d'exécution est lancé de nouveau. Ainsi la commande de la barre pourra être effectuée avec la même facilité qu'à l'aide d'une roue de gouvernail, puisque le pilote aura la faculté d'opérer soit par grands coups de barre, soit par petits coups gradués jusqu'à l'obtention du changement de route désiré. Un signal de zéro ramènera ensuite tous les organes de manœuvre au repos.

Comment concilier cette méthode de commande avec la condition des signaux brefs ?

On connaît la méthode de sélection employée en téléphonie automatique. Pour appeler un poste (n° 7 par exemple) on envoie, à l'aide du cadran d'appel un train de sept impulsions électriques ; pendant

Digitized by Google

la réception de ces impulsions, un sélecteur avance de sept pas et sélectionne le septième circuit ; celui-ci est mis sous courant pendant le silence suivant ce train d'impulsions, car, pendant ce silence, un relais retardé trouve le temps nécessaire pour entrer en action.

Il suffit d'appliqur ce procédé à la télémécanique pour obtenir la préparation des manœuvres par signaux brefs ; en effet, les impulsions de ce genre sont de l'ordre du dixième de seconde. Sur une embarcation, il y a environ huit manœuvres à commander; mais, en pratique, quand le bateau est en marche, il reste seulement deux manœuvres intéressantes, « à droite » et « à gauche »; il suffira de donner à ces deux manœuvres les numéros 2 et 3 pour que la condition de signaux brefs soit satisfaite. La préparation de la manœuvre à droite se traduira par l'émission de deux points de 1/10 de seconde; la préparation de manœuvre gauche se traduira par trois points.

La manœuvre étant ainsi préparée, il est assez facile de combiner un dispositif tel que, pour un point bref un certain circuit soit fermé et reste fermé jusqu'à ce qu'un autre point bref vienne l'ouvrir. Si ce circuit est justement celui de l'alimentation des moteurs de manœuvre, l'exécution durera pendant tout le temps séparant deux points brefs consécutifs d'exécution.

En outre, ces points d'exécution pouvant être répétés, le pilote pourra graduer à volonté l'effort obtenu.

Si, d'autre part, on place un électro retardé sous le contrôle des impulsions de commande, ce relais ne fonctionnera pas pour les impulsions brèves et il suffira de faire une impulsion un peu plus longue, trois dixièmes de seconde par exemple, pour faire agir ce différé qui coupera les différents circuits, provoquant ainsi le retour au zéro du système (fig. 1).

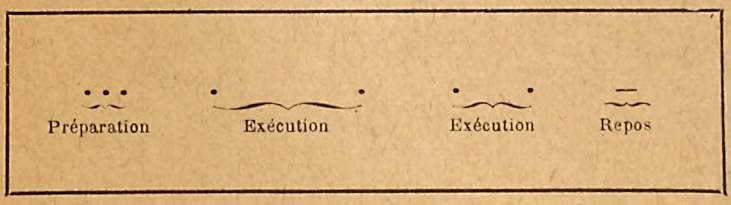


Fig. 1.

Ainsi, pendant la marche de l'embarcation, la direction à distance de celle-ci pourra être obtenue par l'émission de quelques points brefs irrégulièrement espacés et émis d'une façon irrégulière. Dans ces conditions, les sans filistes comprendront combien il sera difficile

Digitized by Google

pour l'ennemi de saisir au vol ces quelques points et, à plus forte raison, d'en mesurer la longueur d'onde et la fréquence de modulation pour reproduire un brouillage efficace.

Cette entrée en matière un peu longue était nécessaire pour faciliter la compréhension de l'équipement télémécanique que je vais présenter :

Le poste émetteur est construit pour permettre la transmission des signaux de commande par une onde porteuse de 300 à 500 m de longueur modulée à 30 000 périodes environ. A cet effet, l'émetteur com-

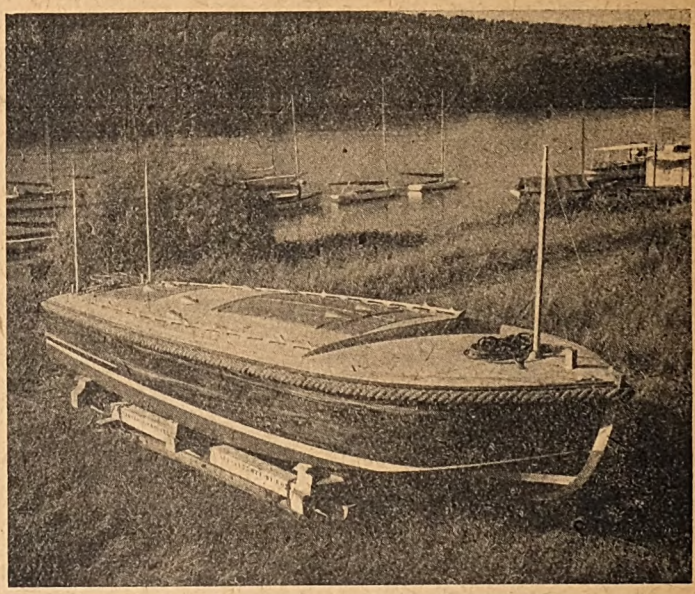


Fig. 2. — Vue de la vedette. On distingue à l'avant le panneau de la chambre des moteurs et à l'arrière le panneau de la chambre de timonerie.

prend deux systèmes oscillants, l'un d'eux générateur de l'onde porteuse; le second générateur de la modulation; chacun de ces systèmes comprend deux lampes de 50 watts (fig. 2).

Le poste émetteur est établi pour être monté à bord d'un avion et permettre la commande télémécanique de la vedette à une distance de 10 km. Il comprend une génératrice entraînée par un moulinet à vitesse constante, une boîte d'émission, une boîte de modulation et un poste de manipulation et de contrôle.

La manipulation a lieu par l'intermédiaire d'un manipulateur spécial genre cadran d'appel de téléphone automatique.

L'embarcation comprend trois compartiments étanches; le compar-

Digitized by Google

timent avant est réservé à la charge ou au lest, le compartiment milieu est occupé par les deux moteurs de propulsion et leurs accessoires, pompes réservoirs, etc., le compartiment arrière renferme

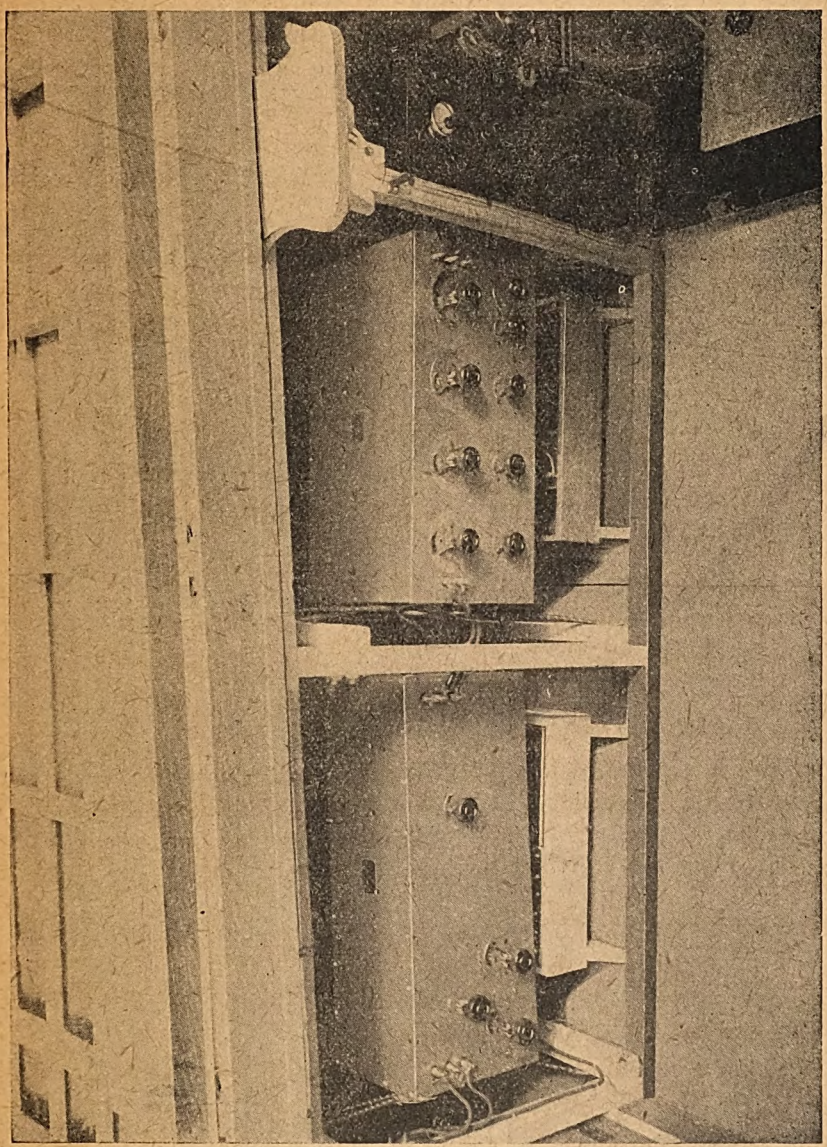


Fig. 3. — Chambre de timonerie. Vue à bâbord. De gauche à droite : le récepteur de l'onde porteuse ; le récepteur de l'onde de modulation et le redresseur-relais.

l'appareillage radiotélégraphique et électrique, le tableau du bord et la batterie d'alimentation (fig. 3).

L'ensemble de réception est composé d'un récepteur d'onde porteuse 300 à 500 m comprenant les circuits d'accord, trois étages am-

Digitized by Google

plification haute fréquence et une détectrice spéciale et d'un récepteur de modulation de 10 à 15 000 m comprenant les circuits d'accord intermédiaires, trois étages d'amplification haute fréquence et une détectrice.

Un dispositif redresseur, placé à la suite des récepteurs, permet d'alimenter un relais genre Baudot qui ferme son contact lors de la réception des signaux.

Tous ces appareils de réception sont montés en boîtes métalliques compartimentées pour éviter l'action des parasites locaux et la réaction entre les différents étages.

Cet ensemble de réception commande le commutateur automatique, véritable cerveau de l'embarcation, qui interprétera les différents signaux pour provoquer les manœuvres correspondantes (schémas 4).

Ce commutateur comprend essentiellement une série de relais de sélection S1 à S8 commandés par un relais de manipulation MN. Lors de la réception d'un train d'impulsion de « Préparation », le relais MN provoque l'excitation successive des relais SI à S8 au fur et à mesure de la réception des impulsions; par exemple, en supposant que le train soit de quatre impulsions, le relais S4 sera excité lors de la quatrième impulsion et provoquera la fermeture partielle de la ligne de sélection 4.

Le relais de manipulation MN commande également un relais différé DIF, celui-ci est monté de telle sorte qu'il ne forme son contact qu'après un certain temps de silence, il reste sans action pendant les silences séparant les points d'un train de « préparation ». Il en résulte que le contact de DIF est fermé un court instant après la réception du train d'impulsion de préparation. Ce relais DIF commande un relais de marquage MA qui alimente les lignes de sélections des relais sélecteurs SI à S8. Par conséquent, en revenant à l'exemple ci-dessus, un court instant après la réception d'un train de quatre impulsions, la borne 4 du commutateur sera mise sous courant, ceci ayant pour résultat, comme il sera exposé par la suite, de provoquer l'excitation de relais convenables pour préparer la manœuvre 4 « plus vite ».

Le commutateur automatique comporte un certain nombre d'électros auxiliaires AX qui, après la préparation d'une manœuvre, aiguillent la ligne venant du contact de l'électro de manipulation MN vers les relais d'exécution EX et AEX; ces électros sont alors placés sous le contrôle du relais de manipulation MN, tandis que les électros sélec-

Digitized by Google

teurs SI à S8 sont isolés. Les points qui seront reçus après la préparation d'une manœuvre agiront donc sur EX et AEX.

L'électro EX met sous tension la borne EX, tandis que l'électro AEX isole cette borne. Les électros EX et AEX, sont disposés pour se com-

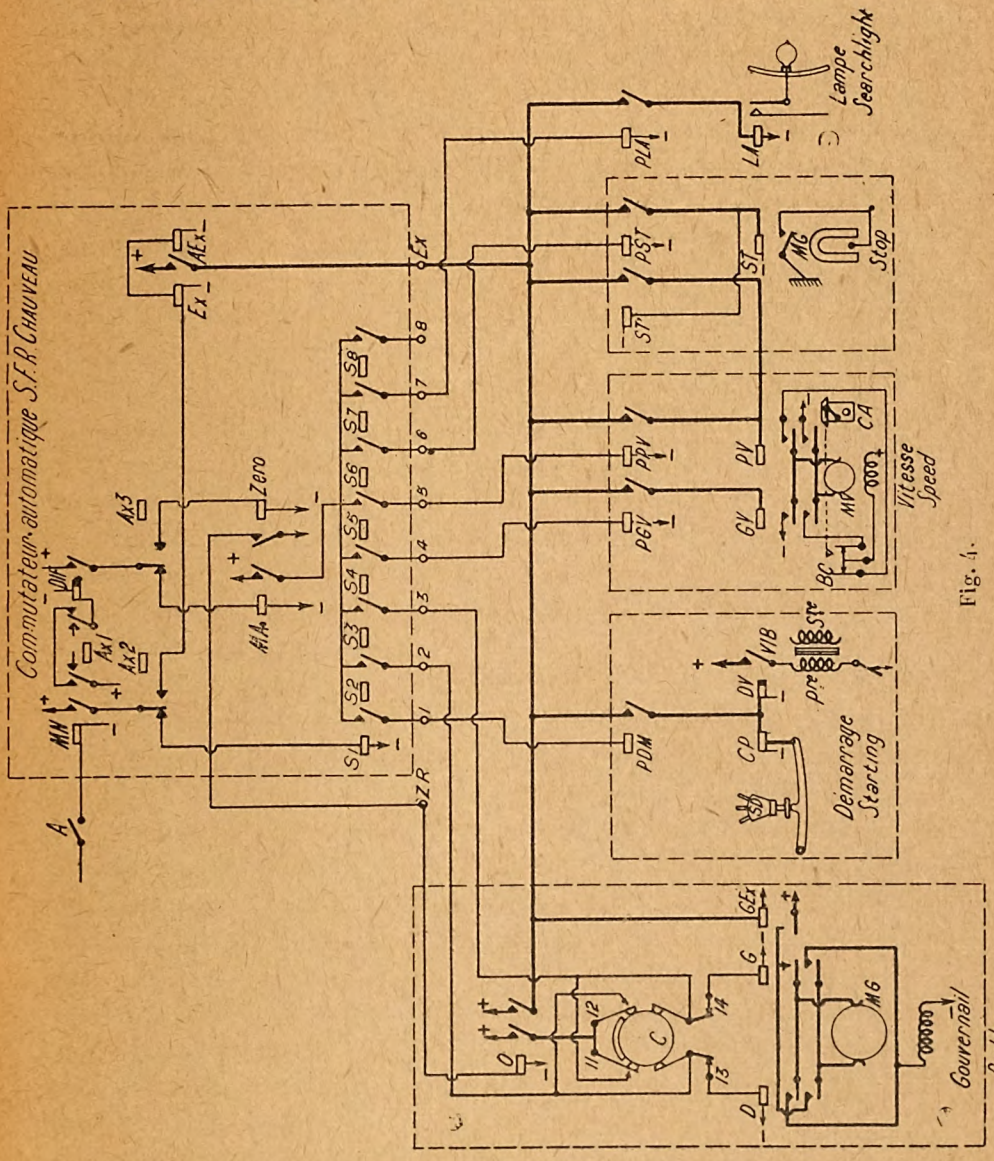


Fig. 4.

mander mutuellement, de façon à être excités alternativement par l'électro MN au fur et à mesure de la réception des impulsions d'exécution. La borne EX est le point de départ de l'alimentation des différents organes de manœuvres.

Digitized by Google

On voit ainsi que, pour une impulsion d'exécution, ces organes sont alimentés, tandis que, pour l'impulsion suivante, l'alimentation est coupée et ainsi de suite.

Après la préparation d'une manœuvre, les électros auxiliaires AX aiguillent également le contact du relais différé DIF vers le relais de zéro. Il en résulte que, après une préparation, si un trait assez long (3/10 de seconde) est reçu, l'électro zéro fonctionne et met le commutateur au repos. En même temps, la borne ZR est mise sous courant ce qui a pour résultat, comme il sera exposé par la suite, de ramener le gouvernail à la position médiane.

On remarquera que, par suite de la disposition spéciale du relais différé, cet électro est à même d'enregistrer le trait de zéro aussitôt après la préparation d'une manœuvre, par conséquent celle-ci peut être annulée sans qu'il y ait exécution. Ceci permet, par exemple, d'annuler une manœuvre préparée par erreur (fig. 5).

Il ressort de l'exposé précédent que le commutateur automatique permet de déclancher chaque commande en deux temps : Préparation et Exécution.

La préparation résulte de la réception d'un train d'impulsions, le nombre des impulsions étant caractéristique de la commande.

Après la préparation d'une manœuvre, celle-ci peut être déclanchée par un point bref et arrêtée par un autre point bref. La manœuvre étant ainsi limitée par deux points d'exécution successifs, il est possible de la renouveler à volonté par l'émission de points d'exécution; quand elle est terminée, les organes de commande peuvent être ramenés au zéro par un trait de l'ordre de trois dixièmes de seconde.

Comme, d'autre part, il est facile de faire correspondre les commandes les plus usuelles, droite et gauche, à des trains de deux et trois impulsions, la condition de brièveté des signaux sera satisfaite tandis que la méthode de commande en deux temps « Préparation » et « Exécution » sera conservée.

L'emploi d'un tel commutateur permet, par conséquent, une très grande souplesse des commandes tout en garantissant le secret des signaux.

Le commutateur automatique utilisé à bord de la vedette est disposé pour commander huit manœuvres qui sont les suivantes :

En avant; plus vite; moins vite; et stop pour la propulsion; à droite; et à gauche pour le gouvernail, le retour au zéro de celui-ci étant obtenu automatiquement lors du trait de trois dixièmes de seconde.

La septième manœuvre est celle d'un projecteur installé à bord.

Digitized by Google

Enfin, la dernière commande reste disponible à toute fin utile.

L'embarcation est entraînée par deux moteurs Hispano-Suiza type avion de 180 ch chacun. L'équipement radiotélémécanique permet

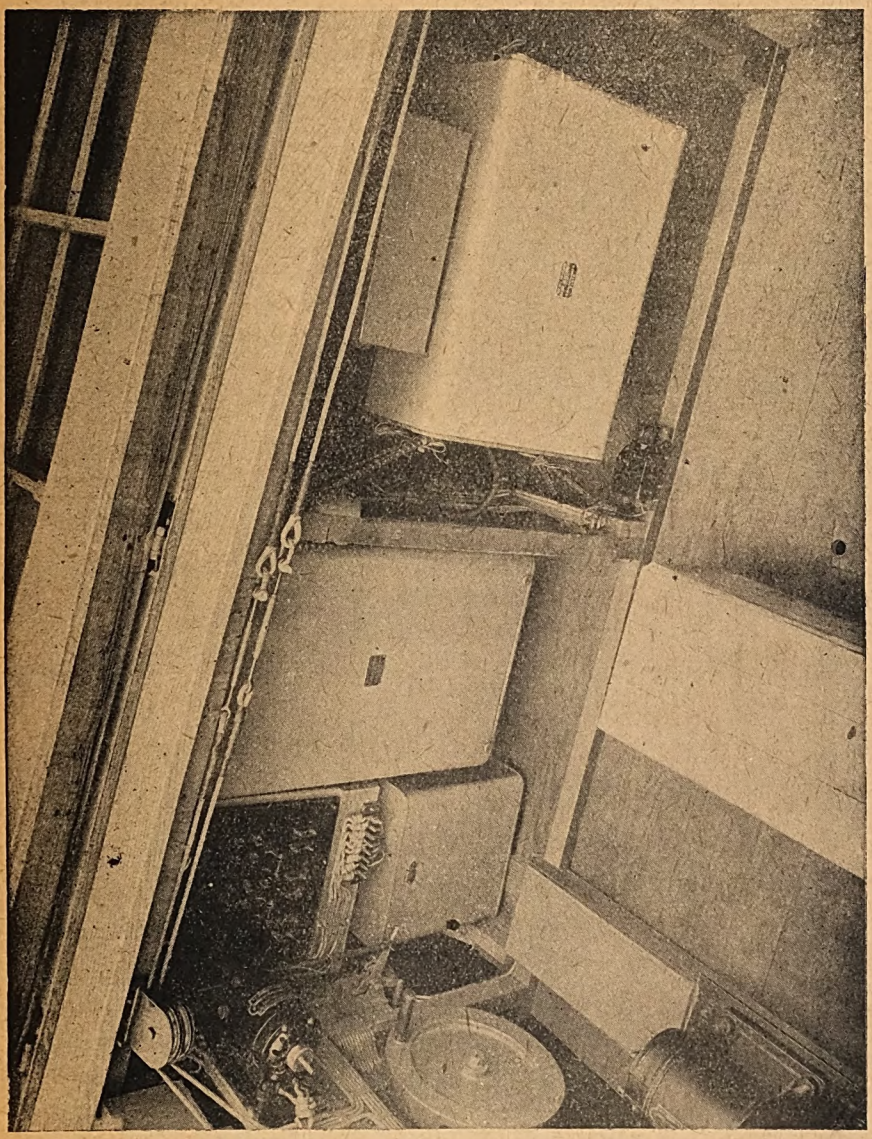


Fig. 5. — Chambre de timonerie. Vue à tribord. A gauche et en haut le tableau de distribution. A gauche et en bas les relais de réglage de la vitesse. Au milieu, les relais de commande de la barre. A droite, le commutateur automatique.

de commander le démarrage, le réglage de la vitesse et l'arrêt de ces moteurs.

Le démarrage se fait à l'aide d'un démarreur spécial à gaz carburé type Saintin; ce démarreur comprend une bouteille d'air comprimé alimentée par un groupe compresseur; un manomètre avec contact

Digitized by Google

électrique est placé entre le compresseur et la bouteille de sorte que, quand la pression baisse dans cette dernière, le moteur du groupe compresseur soit mis en route automatiquement.

Au moment du démarrage, une soupape SD est ouverte, l'air comprimé passe par un carburateur et le mélange carburé est distribué aux cylindres, tandis qu'un allumage spécial par bobines est mis en action.

La manœuvre de démarrage consiste à ouvrir la soupape SD et à mettre en circuit les vibrateurs un petit instant après.

A cet effet, lors de la préparation de la manœuvre, l'électro PDM est excité et ferme son contact; lors de l'impulsion d'exécution par le contact de PDM, l'électro CP est excité et ouvre la soupape SD, le mélange carburé est envoyé dans les cylindres du moteur.

L'électro PDM commande également l'électro retardé DV, celui-ci, un court instant après le début de la manœuvre, provoque la fermeture des circuits des vibrateurs et par conséquent l'allumage et le démarrage des moteurs.

Le réglage de la vitesse est obtenu par l'intermédiaire des commandes « plus vite » et « moins vite » qui correspondent respectivement aux bornes 4 et 5 du commutateur automatique.

Le réglage de la vitesse pour chaque moteur s'obtient à l'aide d'un petit moteur électrique MV qui, par des moyens mécaniques appropriés commande le déplacement du papillon du carburateur CA. Ce moteur est muni de contacts de bout de course pour limiter son action.

Lors de la préparation de la manœuvre « plus vite », c'est-à-dire lors de l'envoi d'un train de quatre impulsions, l'électro PGV est excité et provoque la fermeture partielle du circuit du contacteur GV, celui-ci est actionné dès la réception du premier point d'exécution jusqu'à la réception du point suivant, ce contacteur alimente le moteur MV et le fait tourner dans le sens correspondant à une augmentation de vitesse des moteurs de propulsion.

Le temps d'excitation de GV dépend uniquement du temps séparant deux points d'exécution, on peut donc obtenir à volonté un effet plus ou moins important sur la vitesse. Du reste, tant que le signal zéro n'est pas envoyé, il est possible de faire agir GV, on peut par conséquent, soit passer rapidement de la plus petite vitesse à la vitesse maximum, soit y passer progressivement par petits coups.

Lors de l'envoi du signal zéro, la vitesse des moteurs reste celle à laquelle ils ont été amenés par le dernier signal d'exécution.

Digitized by Google

La préparation de la manœuvre « moins vite » s'obtient par l'envoi d'un train de cinq impulsions, l'électro PPV est alors excité et prépare le circuit du contacteur PV; celui-ci fonctionne lors des signaux

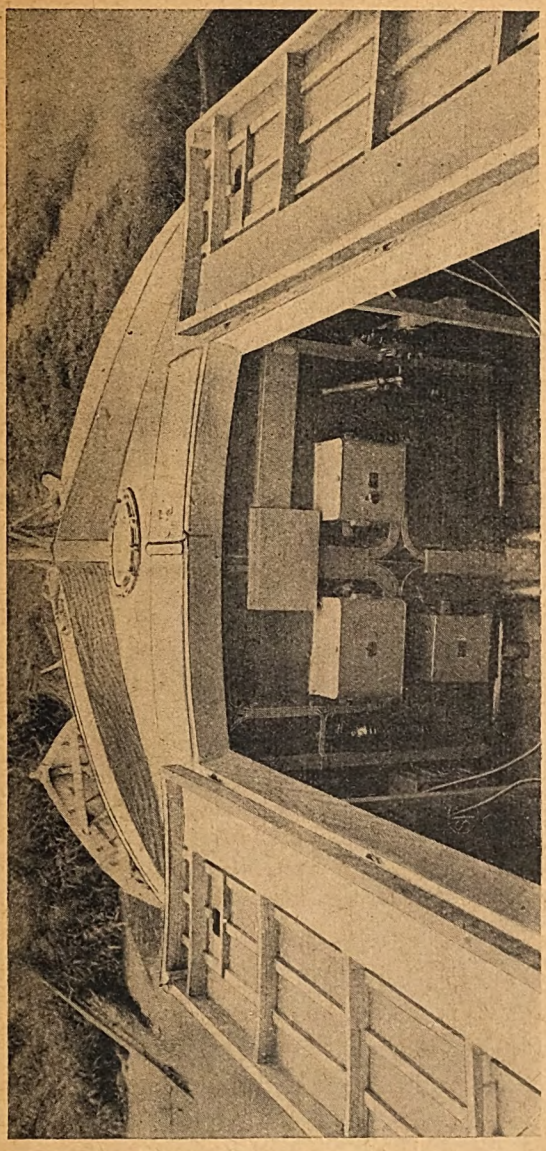


Fig. 6. — Chambre des moteurs.
Vue vers l'avant montrant les organes de démarrage et d'arrêt des moteurs.
Sur le pont on distingue le projecteur.

d'exécution ce qui provoque la mise en marche du moteur MV, dans le sens convenable pour réduire la vitesse. Cette réduction de vitesse peut être évidemment graduée à volonté comme lors de la commande « plus vite ».

Digitized by Google

La commande de la manœuvre « stop » s'obtient par un train de six impulsions qui a pour résultat l'excitation du relais PST; celui-ci prépare le circuit du contacteur ST qui est excité lors de l'envoi du point d'exécution, ce contacteur met à la masse les bornes basse tension des magnétos et provoque, par conséquent, l'arrêt des moteurs de propulsion. Un relais auxiliaire ST' est excité en même temps et provoque l'action du contacteur de petite vitesse PV afin que le papillon du carburateur soit ramené à la position petite vitesse en vue d'un démarrage ultérieur (fig. 6).

On remarquera, sur l'avant de l'embarcation, un projecteur, celui-ci est muni d'une lampe de 300 W et peut envoyer vers le ciel un faisceau lumineux permettant le repérage de la vedette la nuit ou par temps sombre.

Un train de sept impulsions provoque l'excitation du relais PLA qui ferme partiellement le circuit du contacteur LA, celui-ci étant réuni à la ligne d'exécution EX fonctionnera dès le premier signe d'exécution; au signe suivant, il vient au repos et ainsi de suite, le contacteur LA provoque l'allumage de la lampe du projecteur. L'opérateur du poste de commande peut donc, à volonté, allumer ou éteindre le projecteur et régler la durée de l'allumage.

Pour les commandes de direction, le gouvernail de la vedette peut être entraîné, soit à droite, soit à gauche, par un moteur électrique MG dont les circuits peuvent être fermés, soit par le contacteur D, soit par le contacteur G; dans le premier cas, le gouvernail est entraîné vers la droite, dans le second vers la gauche. Toutefois, les circuits du moteur commandés par ces conducteurs ne sont mis sous courant que lors de l'excitation du contacteur GEX.

La préparation de la manœuvre « droite » correspond à un train de trois impulsions, elle se traduit par l'excitation du contacteur D.

La préparation de la manœuvre « gauche » correspond à un train de deux impulsions et se traduit par l'excitation du contacteur G.

Après la préparation de l'une ou l'autre de ces deux manœuvres, l'envoi d'une impulsion d'exécution provoque l'action du contacteur GEX et par conséquent la mise en marche du moteur de barre dans le sens convenable, l'envoi d'un second point d'exécution arrête le moteur et par conséquent la barre sur le point où elle est arrivée; on peut alors, soit ramener au zéro, soit augmenter l'angle de barre dans la même direction par de nouvelles impulsions d'exécution. On voit ainsi qu'il est facile d'orienter la barre, soit rapidement, soit progressivement par petits coups, dans un sens ou dans un autre.

Digitized by Google

Le moteur de barre est muni d'un dispositif de retour au zéro et de bout de course. Ce dispositif est constitué par une came C, munie d'un épaulement formant secteur. Cette came est accouplée au moteur à l'aide d'une démultiplication appropriée.

Lorsque le gouvernail est au zéro, la came occupe la position indiquée sur le dessin; dès le début de la rotation vers la gauche, la came ferme le contact 11; à la fin de cette rotation elle ouvre le contact 13, ce qui ouvre le circuit du contacteur G et arrête le moteur; dès le début de sa rotation vers la droite, la came ferme le contact 12; à la fin de cette rotation elle ouvre le contact 14, ce qui arrrête la rotation. Les contacts 13 et 14 sont des contacts de bout de course.

Les contacts 11 et 12 sont utilisés pour préparer le retour du gouvernail à sa position médiane au moment de la commande de zéro.

A cet effet, quand la barre tourne sur la gauche le contact 11 est fermé, ce contact est réuni au circuit du contacteur D commandant la manœuvre « droite ». Au moment du signal zéro, la borne ZR du commutateur automatique est mise sous tension, le relais O de l'équipement du gouvernail est excité, ce relais alimente les contacts 11 et 12; comme 11 est fermé le contacteur D fonctionne. Le relais O alimentant également le contacteur GEX, le moteur tourne à droite et ramène la barre jusqu'à sa position médiane, car à cette position, l'épaulement de la came C se trouve entre les contacts 11 et 12, qui sont alors ouverts, le contacteur D vient au repos et le gouvernail s'arrête.

Si, au contraire, la commande de barre avait été une commande droite, le contact 12 aurait été fermé pendant cette manœuvre et c'est la manœuvre gauche qui aurait été déclanchée lors de la commande zéro.

On voit ainsi que tout signal « zéro », envoyé après une commande de barre à gauche ou à droite, provoque le retour à zéro du gouvernail. Toutefois, si au cours du mouvement de retour à zéro, une nouvelle commande est lancée, la barre s'arrête sur la position où elle se trouve au moment de la réception de cette nouvelle commande, comme celle-ci peut être une commande « droite » ou « gauche » la position du gouvernail peut être modifiée autour d'un point quelconque.

L'équipement du commutateur automatique comporte une manœuvre supplémentaire actuellement disponible qui peut être utilisée, par exemple, pour provoquer l'armement ou le désarmement

Digitized by Google

d'un percuteur commandant la charge d'explosifs ou pour assurer le lancement d'une torpille ou le mouillage de mines (fig. 7).

On voit, en haut et à gauche de la figure le dispositif de *commande*

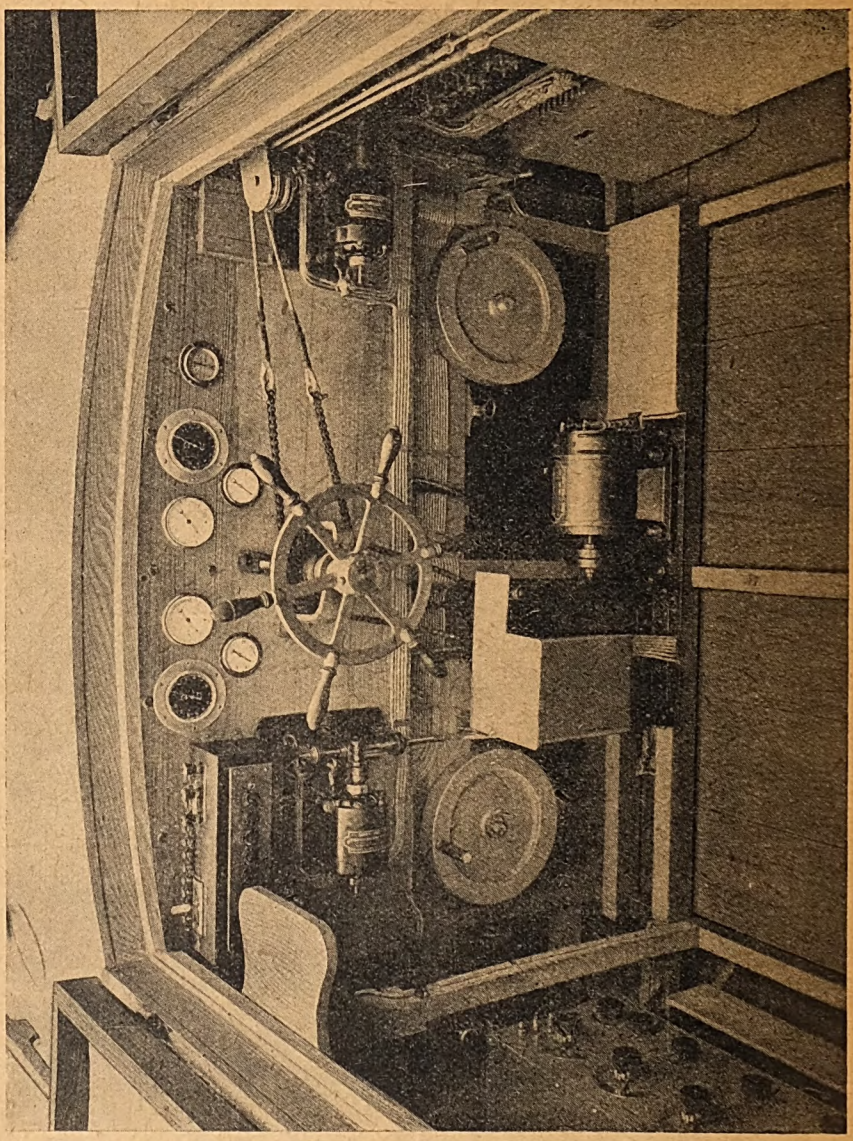


Fig. 7. — Chambre de timonerie. Vue vers l'avant. A gauche et à droite les moteurs de réglage de la vitesse. En bas le moteur de la barre. En haut et à gauche le tableau pour la commande locale des manœuvres.

à main constitué par un certain nombre de boutons permettant de commander directement à la main les différents contacteurs et de provoquer les différentes manœuvres de la vedette sans passer par l'intermédiaire du système de T. S. F. et du commutateur; cette

Digitized by Google

commande à mains est très utile pendant la période de réglage et de mise au point des différents organes.

L'alimentation des différents circuits et organes électriques est assurée par une batterie d'accumulateurs de 80 V 40 Ah montée en tampon sur une génératrice de 500 W entraînée par un des moteurs de propulsion, cette batterie a été établie spécialement pour le but visé son étanchéité est absolue quels que soient les mouvements de l'embarcation. Un tableau de distribution avec conjoncteur-disjoncteur et

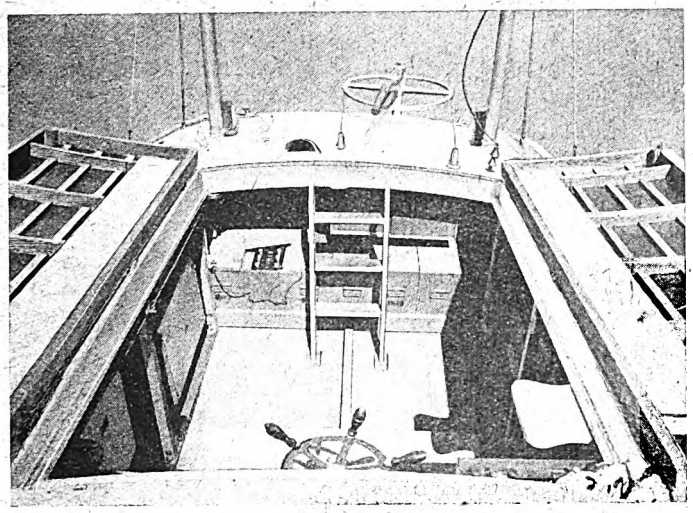


Fig. 8. — Chambre de timonerie. Vue vers l'arrière montrant la batterie d'accumulateurs et l'entrée de l'antenne (sur le pont à droite).

appareils de mesure porte les interrupteurs et fusibles des principaux circuits (fig. 8).

Des précautions minutieuses ont été prises à bord de la vedette dans son installation; les magnétos des moteurs, les bougies et les fils d'allumage ont été mis en cage de Faraday; le compartiment des machines lui-même est enveloppé entièrement d'un cloisonnement métallique formant cage de Faraday soigneusement mise à la masse. Les contacteurs employés construits par la Télémécanique Electrique sont du type marine; les différents relais ont été disposés pour que tous leurs contacts soient doublés par mesure de sécurité; enfin les appareils de réception et le commutateur sont suspendus sur sandow à l'aide du dispositif employé à bord des avions; dans ces conditions le fonctionnement est parfaitement assuré quelle que soit la vitesse ou la situation de l'embarcation.

Cette embarcation a été construite par la Société centrale de cons-

Digitized by Google

tructions navales d'après les plans de l'architecte naval AUCHÉ, ses caractéristiques sont les suivantes :

longueur à la flottaison : 9 m 50
largeur hors tout : 3 m
tirant d'eau : 1 m
déplacement en charge : 5 tonnes.

Cette vedette munie de deux moteurs Hispano Suiza type avion de 180 chevaux chacun a pu atteindre une vitesse de 37 nœuds, soit de 70 kilomètres à l'heure en portant une charge utile de 800 kg. Ses approvisionnements lui permettent de maintenir cette vitesse pendant trois heures; son rayon d'action est ainsi de l'ordre de 200 km.

Tous les organes entrant dans l'équipement de cette embarcation ont subi une série rigoureuse d'essais pratiques tant au point de vue télémécanique qu'au point de vue nautique.

En particulier, les récepteurs ont été placés pendant un certain temps en ordre de marche dans l'usine de la Société Française Radioélectrique au voisinage immédiat de nombreux postes de tous types et de toutes puissances, ils ont été installés ensuite au voisinage de la tour Eiffel, puis dans une villa voisine du fort d'Issy-les-Moulineaux, ces épreuves ont duré plusieurs jours dans chaque endroit et jamais les appareils n'ont fonctionné intempestivement quelles que soient les émissions en cours.

Le bateau complètement équipé a ensuite été mis en essai dans le bassin de Meulan, sa commande télémécanique a toujours été largement assurée dans un rayon supérieur à 10 km; en effet alors qu'une variation de courant de l'ordre de 700 microampères assurait parfaitement le fonctionnement du relais de T. S. F., l'émission à une distance de 10 km provoquait encore une variation de l'ordre de 1 500 microampères. Les récepteurs n'ont jamais enregistré aucun parasite ou brouillage susceptible de faire fonctionner le commutateur, en particulier lorsque la vedette était placée à quelques mètres de l'émetteur, les récepteurs étant bien accordés, les relais étaient absolument insensibles à l'onde porteuse émise à toute puissance quand celle-ci n'était pas modulée.

Au point de vue nautique cette embarcation a toujours pu être commandée avec la plus grande souplesse quelle que soit sa vitesse.

Voyons maintenant pour terminer quelles sont les applications tactiques de ces engins.

Evidemment une seule embarcation de cette espèce bien que peu vulnérable étant donné sa rapidité et ses dimensions n'entravera pas

Digitized by Google

beaucoup les évolutions d'une escadre; mais on peut facilement envisager la constitution de ces engins en escadrille de quatre ou cinq ou même davantage pouvant être commandés soit d'un seul, soit de plusieurs avions.

En outre, il n'est pas indispensable que ces embarcations soient commandées par T. S. F. dans bien des cas, au contraire, il sera plus avantageux et plus sûr de les commander par fil.

En 1917 sur les côtes belges, les Allemands ont utilisé des vedettes commandées par fil, l'une d'elles réussit à atteindre un monitor anglais; or les engins allemands que nous avons pu examiner étaient bien moins souples au point de vue commande que l'embarcation qui vient de vous être présentée.

En admettant la commande par fil, rien n'empêche chacun des bâtiments d'une escadre d'embarquer une ou deux vedettes de ce genre; l'escadre pourra aussi mettre à la mer en temps opportun une vingtaine de ces engins rapides et l'apparition de ceux-ci à travers la ligne ennemie y jettera certainement la plus grande perturbation. Or ceci n'est pas impossible; le problème du déroulement du câble à bord de la vedette est solutionné. Si on admet, ce qui est également possible, que le cuirassé puisse avoir à son bord un câble déroulable, les deux câbles étant réunis en un point fixe sur un corps mort par exemple, le cuirassé et ses vedettes pourront évoluer sans se gêner mutuellement. Ainsi l'escadre pourra disposer d'une véritable escadrille d'assaut comme l'armée moderne dispose de tanks.

Il n'est pas indispensable que la vedette soit sacrifiée à chaque lancement, on peut très bien au lieu de lui faire porter une charge explosive la munir de deux torpilles qui seront lancées automatiquement quand l'embarcation passera par le travers à peu de distance d'un bâtiment ennemi; ou bien la vedette portera par exemple une douzaine de mines dont le mouillage sera commandé par le commutateur; il sera possible alors d'aller mouiller ces mines sur la route de l'ennemi.

Quel que soit le type d'engin employé : vedette, torpille dirigée, vedette lance-torpille ou mouilleuse de mine, commandée par fil ou par radio, l'équipement de télécommande que je vous ai présenté sera convenable, et l'emploi judicieux de tels engins peut être un précieux appoint pour une marine militaire, soit pour renforcer les moyens offensifs d'une escadre, soit pour assurer la défense des côtes, des ports ou des passages maritimes (fig. 9).

Evidemment, il aurait été possible de parfaire l'équipement de

Digitized by Google

cette vedette en lui adjoignant par exemple des dispositifs permettant de changer périodiquement et automatiquement les réglages des longueurs d'onde des récepteurs et de l'émetteur pour rendre la détermination des conditions de brouillage encore plus difficile. Il aurait été assez facile également d'équiper l'embarcation avec un giro-compas ou mieux un giro-pilote associé au commutateur automatique pour permettre la navigation en cap.

Fig. 9. — La vedette télémécanique, système S. F. R.-Chauveau.

Digitized by Google

De même un système répétiteur constitué par un petit émetteur de T. S. F. aurait pu être installé à bord et disposé pour transmettre automatiquement un signal caractéristique de chaque manœuvre après la préparation de celle-ci.

Mais la Société Française Radio-Electrique nous avait chargé d'étudier un appareil sûr et souple, c'est pourquoi nous avons préféré ne pas compliquer l'installation pour atteindre simplement le but : la réalisation d'un engin robuste simple et facile à manier.

Digitized by Google

LES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES[1]

par M. L. JUMAU

Directeur technique à la Compagnie Générale d'Electricité.

L'auteur expose quelques considérations théoriques sur les accumulateurs ; il défend la théorie de la double sulfatation contre les critiques de MM Féry et Chéneveau et il discute les conclusions qu'ils ont déduites de leurs mesures. Il examine la possibilité de réaliser un accumulateur supérieur à l'accumulateur au plomb et critique les résultats annoncés pour le nouvel accumulateur d'Almeida. Passant ensuite aux applications, il énumère les emplois de plus en plus nombreux des accumulateurs en batteries stationnaires et en batteries transportables.

Nous ne donnons ici que des extraits de la communication. certaines questions ayant été déjà traitées antérieurement par l'Auteur dans ce Bulletin.

QUELQUES CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES.

Il est impossible de parler des accumulateurs sans mentionner que la théorie classique de l'accumulateur au plomb, celle de la double sulfatation est battue en brèche par Charles FÉRY.

Cet éminent savant, reprenant une vieille hypothèse émise par DRZEWIECKI, soutint en 1917 (2) que la matière active positive est l'oxyde supérieur Pb^2O^5 et que la réaction de décharge correspond à la réduction de cet oxyde en peroxyde PbO^2, alors que la théorie de la double sulfatation considère que la matière active positive est ce peroxyde de plomb PbO^2 qui se transforme en sulfate de plomb pendant la décharge.

Dès cette époque (3), nous avons discuté ce point et nous avons montré que cette hypothèse de Ch. FÉRY est en désaccord avec les faits d'expérience.

Sans entrer dans les détails, nous dirons que l'analyse de la matière, aussi bien que la détermination des variations de concentration de l'électrolyte, montrent que la matière positive se sulfate pendant

(1) Communication faite à Lyon, devant le groupe Sud-Est de la Société française des électriciens, le 26 octobre 1927.

(2) *Revue Générale de l'Electricité*, 6 janvier 1917, t. I, p. 10.

(3) *Revue Générale de l'Electricité*, 4 août 1917, t. II, p. 165.

Digitized by Google

la décharge, et que la proportion de sulfate formé est très voisine de celle qu'indique la théorie de la double sulfatation.

D'autre part, le coefficient d'utilisation de la matière active positive, c'est-à-dire le rapport entre la capacité obtenue et la capacité théorique, pour une masse déterminée de cette matière active, ressortirait à une valeur notablement supérieure à l'unité dans l'hypothèse de Ch. FÉRY, ce qui est évidemment impossible.

En 1926, Ch. FÉRY et Ch. CHÉNEVEAU (1) ont publié un nouveau travail dont la conclusion était que la théorie Ch. FÉRY doit remplacer définitivement la théorie de la double sulfatation.

Nous nous sommes permis de faire remarquer (2) qu'il y avait peut-être quelque hâte à tirer une telle conclusion.

Si la théorie de la double sulfatation nous paraît être le mieux en accord avec les faits d'expérience, nous n'oserions prétendre qu'elle est intangible. Ce qu'il faut considérer, c'est si l'harmonie est plus grande entre la théorie nouvelle et l'expérience, qu'entre celle-ci et la théorie de la double sulfatation.

Les seuls résultats d'expériences apportés par Ch. FÉRY et Ch. CHÉNEVEAU, sont relatifs à la variation de poids des électrodes pendant la décharge. Avec des précautions un peu spéciales, telles qu'un excès d'électrolyte pour pouvoir négliger ses variations de concentration, on peut mesurer cette variation de poids et la comparer à la variation théorique d'après l'une ou l'autre des théories.

Or, voici les chiffres trouvés par les auteurs sur une plaque négative, et sur une plaque positive.

			Positive.	Négative.
Variation de poids en grammes pendant la décharge	Mesurée		+ 5,5	+ 10,1
	Théorique	d'après la double sulfatation	+ 9,55	+ 14,32
		d'après la théorie Ch. Féry	— 2,43	+ 14,32
	Mesurée après correction		+ 9,54	+ 15,55

Si, d'après ces chiffres, aucune des deux théories ne paraît concorder avec la mesure, on ne peut vraiment pas en tirer argument en faveur de la théorie Ch. FÉRY.

Mais il faut faire remarquer que la variation de poids mesurée dans ces essais, n'est qu'une variation apparente, car elle ne tient pas compte de l'influence de la poussée de l'électrolyte, poussée qui n'est

(1) *Revue Générale de l'Electricité*, 20 février 1926, page 296.
(2) *Revue Générale de l'Electricité*, 14 août 1926, page 235.

Digitized by Google

pas la même au début et à la fin de la décharge, puisque la matière varie de volume.

Reprenant les chiffres ci-dessus mesurés, nous y avons apporté la correction due à la variation de volume de la matière active dans le cas de la double sulfatation, et nous avons alors trouvé les chiffres indiqués au tableau sous la rubrique « Mesurée après correction ».

Loin de venir à l'appui de la nouvelle théorie, les expériences mentionnées apporteraient donc une confirmation à la double sulfatation.

A l'occasion de ce nouveau travail, Ch. Féry traduit comme suit les réactions de décharge de l'accumulateur au plomb

$$Pb^2 + H^2SO^4 + Pb^2O^5 = Pb^2SO^4 + H^2O + 2PbO^2.$$

alors que la théorie de la double sulfatation les représente par

$$Pb + 2H^2SO^4 + PbO^2. = 2PbSO^4 + 2H^2O$$

Après s'être attaqué à l'électrode positive, ainsi que nous venons de le voir, Ch. Féry critique la théorie de la double sulfatation dans les réactions de l'électrode négative. D'après lui, la décharge ne transformerait pas le plomb spongieux en sulfate de plomb $PbSO^4$, mais en un sulfate plombeux Pb^2SO^4.

Il faut bien dire qu'au point de vue purement chimique, il n'y a pas ici entre la nouvelle théorie et l'expérience, la discordance que nous constations pour la positive. C'est qu'en effet, dans l'état actuel de nos connaissances, il est à peu près impossible, lorsqu'on dose dans la matière active négative déchargée, le plomb spongieux restant et le sulfate de plomb formé, de dire si l'on se trouve en présence d'un mélange de ces deux corps ou de leur combinaison sous forme de ce sulfate plombeux hypothétique Pb^2SO^4.

Cependant, nous avons fait remarquer qu'en supposant cette formation de sulfate plombeux, il faudrait théoriquement, non plus 3,86 de plomb spongieux par ampère-heure d'après la double sulfatation, mais le double 7,72. Or, comme dans certains essais, nous avons pu atteindre un coefficient d'utilisation de 0,67, il en résulterait un coefficient d'utilisation de 1,34 d'après la théorie de Ch. Féry, ce qui est évidemment impossible.

Pour pouvoir quand même admettre cette formation de sulfate plombeux, il faudrait supposer que, lorsque le plomb spongieux est passé à cet état, les réactions de décharge de la négative peuvent se pour-

Digitized by Google

suivre par transformation du sulfate plombeux en sulfate plombique. On devrait alors, dans cette hypothèse, relever dans la courbe de tension d'une négative en décharge, deux phases nettement distinctes. Comme l'expérience montre qu'il n'en est pas ainsi, il n'y aurait plus alors qu'une raison à donner, c'est que la chaleur de formation du sulfate plombeux ne diffère pas sensiblement de celle du sulfate plombique. S'il en était réellement ainsi, la question de savoir si la matière négative déchargée est un mélange de plomb spongieux et de sulfate plombique ou un mélange de plomb spongieux, de sulfate plombeux et de sulfate plombique perdrait presque tout son intérêt.

Pour en terminer avec ces considérations théoriques, nous dirons que cette question de la théorie de l'accumulateur au plomb a été mise à nouveau en discussion à la semaine d'octobre de 1926 de la Société Française des Electriciens, puis dans une séance du 26 janvier 1927, commune à la Société de Chimie industrielle (1), et que M. Ch. Liagre y a appuyé nos raisons en signalant notamment que les essais de détermination de la variation de concentration de l'électrolyte pendant la décharge et pendant la charge, lui ont montré que l'électrode positive se comportait exactement comme l'indique la théorie de la double sulfatation.

Des vœux ont été émis pour que les chimistes s'intéressent à cette importante question théorique, mais notre point de vue est que, pour le présent, il n'y a rien à changer à l'ancienne théorie de la double sulfatation, car c'est elle qui jusqu'ici s'est révélée le mieux en accord avec l'expérience.

De la possibilité de trouver un accumulateur supérieur a l'accumulateur au plomb.

On sait qu'il existe d'autres piles réversibles que l'accumulateur au plomb. Nous nous permettrons de rappeler que dans nos ouvrages (2) sur la question, nous avons traité ce point particulier en détail et nous avons indiqué les avantages et les inconvénients respectifs de nombreuses piles réversibles.

Aucune d'elles jusqu'ici n'a réuni toutes les qualités nécessaires et

(1) *Bulletin* de la Société française des électriciens, 4e série, tome VI, n° 64, décembre 1926, page 134
Revue Générale de l'Electricité, 6 août 1927, page 229.
(2) *Les accumulateurs électriques*, par L. Jumau, éditions 1904 et 1907. Dunod, éditeur.
Etude résumée des accumulateurs électriques, éditions 1919 et 1924. Dunod, éditeur.

Digitized by Google

une seule a pu trouver quelques applications à côté de l'accumulateur au plomb, qui reste le plus employé. Nous voulons parler de l'accumulateur fer-nickel, trop connu pour que nous ayons à en faire ici une description.

Ce serait nier le progrès que d'affirmer qu'il n'est pas possible de trouver d'accumulateurs supérieurs à ceux existants qui, d'ailleurs, sont eux-mêmes encore perfectibles.

Mais quand on considère l'excellent rendement de l'accumulateur au plomb et son prix comparé à sa durée, on n'entrevoit pas encore d'autre élément capable de le remplacer avantageusement dans toutes les applications à poste fixe, ce que l'on appelle les batteries stationnaires.

Dans les applications dites transportables, c'est-à-dire dans lesquelles interviennent les questions de poids et d'encombrement, il est permis d'espérer théoriquement des solutions plus avantageuses au point de vue de l'énergie spécifique, que celles données par l'accumulateur au plomb et par l'accumulateur fer-nickel. Cependant, jusqu'ici, aucune de celles qui ont été préconisées n'a pratiquement montré de supériorité à ce point de vue, alors qu'elles offraient par ailleurs de multiples inconvénients. Nous ne citerons que pour mémoire l'accumulateur au zinc (le couple zinc — acide sulfurique — peroxyde de plomb) qui fait actuellement, notamment en Italie, l'objet d'études nouvelles.

Nous verrons d'ailleurs par la suite que c'est surtout à son appellation d'accumulateur *au plomb*, que cet appareil doit la réputation injustifiée d'être très lourd. Les chiffres que je vous indiquerai vous montreront, au contraire, que c'est avec l'accumulateur au plomb que l'on a pu réaliser jusqu'à ce jour les plus grandes énergies massiques.

Serions-nous, sur ce point, à la veille d'une grande révolution ? C'est ce que nous annonce la presse espagnole depuis le début de cette année, et la presse française depuis peu de temps.

Dans ces articles, il est question d'un accumulateur merveilleux, découvert par l'Espagnol Almeida, et qui posséderait, à égalité de poids, une capacité 10 fois plus grande que celle de l'accumulateur au plomb. Son rendement atteindrait 100 pour 100 en quantité et 93 pour 100 en énergie.

Au point de vue pratique, cette même presse nous apprend qu'une automobile électrique, munie de tels accumulateurs, pourrait parcourir 1000 kilomètres sans recharge, que la Compagnie du chemin de fer de Paris à Orléans, a brusquement arrêté ses travaux d'électrification,

Digitized by Google

dans l'espoir de pouvoir appliquer ces accumulateurs à la traction électrique, que la plus importante fabrique allemande d'accumulateurs, l'Accumulatoren-Fabrik A. G., construirait les nouveaux éléments, après avoir obtenu les résultats les plus satisfaisants aux essais, etc... etc...

Nous arrêterons là les citations relatives aux mérites de l'invention nouvelle, car un tout petit article paru dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 30 juin 1927 (page 950), vient jeter une première douche sur cet ardent foyer de louanges.

D'après la *Revue Générale de l'Electricité* du 3 septembre 1927, qui donne une traduction de cet article, la vérité est toute autre. La Société allemande en question a bien fait des essais, mais ceux-ci ont montré que les accumulateurs Almeida, avaient une énergie massique et un rendement notablement moindres que les accumulateurs employés couramment. Etant donné, d'autre part, les dangers offerts par ces éléments, elle a abandonné l'affaire après six mois d'essais approfondis.

Dans la *Revue Générale de l'Electricité* du 10 septembre 1927 (page 375), nous décrivons tout d'abord le nouvel accumulateur d'après le brevet français. Il s'agit simplement d'un accumulateur aux halogènes, dans lequel l'électrode négative est constituée par du zinc, l'électrode positive par une substance conductrice inattaquable (graphite argenté) et l'électrolyte, par un mélange de chlorure et de bromure de zinc.

Il ne faut pas croire qu'il s'agit d'une nouveauté puisque, ainsi que le reconnaît l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, cet accumulateur est décrit et discuté avec beaucoup de détails dans notre ouvrage *Les accumulateurs électriques* de 1904.

Lorsqu'on charge un tel élément, le zinc se dépose à la cathode, tandis que le brome, puis le chlore deviennent libres à l'anode (sauf une petite partie du chlore, qui se combine sous forme de chlorure d'argent avec l'argent du graphite argenté). Il y a combinaison du chlore et du brome sous forme de chlorure de brome.

Bien que le brevet soit muet au sujet des détails de montage de l'élément, nous pouvons dire que celui-ci comporte un vase poreux, le zinc s'attaquant rapidement à circuit ouvert en présence du chlorure de brome, comme en présence du chlore ou du brome dissous.

En décharge, il y a deux phases utilisables : pendant la première, le zinc se recombine au chlore sous forme de chlorure de zinc, tandis

Digitized by Google

que pendant la seconde, il se forme du bromure de zinc, soluble par combinaison du zinc et du brome. Pendant ces deux phases de décharge, la force électromotrice s'abaisse d'environ 2,10 V au début, à 1,80 V à la fin. Il y a bien une troisième phase de décharge pendant laquelle le zinc passe à l'état de chlorure de zinc et le chlorure d'argent de la positive se réduit en argent métallique; mais cette phase est peu importante et pratiquement inutilisable à cause de la faible force électromotrice correspondante (environ 1 V).

Dans notre ouvrage de 1904, nous indiquions que nous avions obtenu avec un accumulateur au brome et à un régime de décharge lente, 13 Ah par kg de poids total. Avec un vase poreux peu résistant, l'énergie massique correspondante serait de 20 à 25 Wh par kg d'élément. Ces valeurs sont de l'ordre de grandeur de celles obtenues par l'Accumulatoren-Fabrik sur les éléments Almeida.

Est-ce à dire qu'il ne soit pas possible d'obtenir mieux ? Nous croyons au contraire à cette possibilité et dans l'article cité ci-dessus, nous envisagions comme réalisable une énergie massique double ou triple, avec une construction appropriée et l'emploi d'une solution de concentration convenable en chlorure de zinc et en bromure de zinc.

Mais il faut remarquer ici qu'avec l'accumulateur au plomb, on a déjà réalisé une énergie massique dépassant 50 Wh par kg, que le nouvel élément aurait une résistance intérieure beaucoup plus élevée que celle de l'accumulateur au plomb et que de nombreuses difficultés pratiques resteraient à résoudre, concernant la régularité du dépôt de zinc, les actions locales, l'attaque de l'anode, la durée des électrodes, le bac, la fermeture de l'élément, etc..., sans parler de la question économique, le brome et l'argent étant des produits très coûteux, et de la question hygiénique, le chlore, le brome et le chlorure de brome étant des produits très toxiques.

Laissons donc les utopistes rêver d'accumulateurs dix fois plus légers que les accumulateurs existants et disons-nous bien que l'apparition de tels éléments, même en les supposant parfaitement au point, serait beaucoup moins désirable, si ces éléments restaient coûteux, que celle d'éléments sinon plus légers, du moins plus économiques que ceux que nous utilisons. La magie du mot aidant, on reste trop tenté de ne considérer dans l'accumulateur que l'énergie qu'il est capable d'absorber et de récupérer. Rappelons-nous qu'un accumulateur, dix fois plus léger que ceux actuels, ne donnerait encore que 500 Wh par kg, ce qui ne correspond qu'à 430 calories (kg degré), alors qu'un kg d'essence représente 11 000 calories. Voilà qui nous

Digitized by Google

rendra plus modestes et nous fera mieux apprécier cette qualité, réelle celle-la, des accumulateurs actuels, d'être économiques. Examinons donc leurs applications présentes et celles qu'ils sont susceptibles de réaliser.

Les accumulateurs électriques dans leurs applications.

Notre intention n'est pas de décrire ici en détail toutes les applications des accumulateurs. Beaucoup d'entre elles sont trop connues pour que cette description offre quelque intérêt.

En revanche, nous insisterons plus particulièrement sur les applications relativement récentes et sur les applications possibles.

a) *Batteries stationnaires.* — Les batteries stationnaires sont employées depuis si longtemps qu'il semble qu'il n'y ait plus rien à dire à leur sujet. Que ce soit dans une station centrale ou dans une installation particulière, la batterie d'accumulateurs permet de réduire la puissance des machines installées et de faire travailler celles-ci dans les meilleures conditions économiques, en assurant constamment leur fonctionnement à puissance maximum. En effet, la batterie peut absorber pour sa charge l'énergie disponible à certaines heures et au contraire contribuer par sa décharge à la fourniture de cette énergie à d'autres heures.

Inversement, son installation dans une usine pourvue d'un matériel — machines d'une puissance déterminée permet d'augmenter dans une forte proportion la puissance disponible à certaines heures de la journée, tout en améliorant comme précédemment les conditions économiques.

Si l'on joint à cela que la batterie d'accumulateurs constitue un secours incomparable, puisque, instantanément, elle peut être mise en service en remplacement d'un groupe générateur brusquement avarié et puisqu'elle est capable de débiter à des intensités considérables, on peut même s'étonner que son emploi, déjà très étendu, ne soit pas tout à fait général.

Dans cette application, on ne rencontre que l'accumulateur au plomb à cause de son excellent rendement, de ses qualités économiques et de sa grande aptitude aux décharges très rapides.

Dans une communication faite en octobre 1925 à la Société Française des Electriciens, nous avons insisté sur le rôle économique des batte-

Digitized by Google

ries qui suppriment ou atténuent considérablement les heures creuses et nous avons signalé qu'à notre point de vue, même si les batteries de stations centrales ne paraissaient pas *a priori* devoir procurer une économie, leur présence s'imposerait au seul titre de secours. Il nous paraît, en effet, indiscutable que la moindre interruption de courant doit avoir, si on se place au point de vue de l'intérêt général (commerce, industrie, particuliers, etc...), des conséquences économiques autrement grandes que celles résultant d'une légère augmentation du prix de revient de l'énergie électrique, en supposant que les batteries ne servent que de secours.

Nous avons donné en exemple les Etats-Unis où, dans 25 des principales villes, on trouvait l'année dernière comme batterie servant uniquement de secours (Stand-by batteries), 169 grosses batteries capables d'assurer pendant une heure un débit de 841 000 A sous 250 V. Dans la seule agglomération de New-York (New-York et Brooklyn), il existait 76 de ces batteries pouvant fournir pendant une heure 375 000 A sous 250 V, soit une puissance totale de 94 000 kW ou 127 000 ch.

On attache une telle importance à avoir la plus grande capacité possible dans un encombrement déterminé, que toutes ces batteries sont montées avec plaques épaisses à oxyde rapporté, qui sont moins encombrantes que nos batteries stationnaires à plaques positives à grande surface. La durée des plaques est néanmoins très grande, car les batteries ne débitent qu'exceptionnellement en cas de panne de machines, de sorte que les charges financières dues à la présence de ces batteries sont relativement minimes.

Pour donner une idée de l'importance de ces batteries, beaucoup d'entre elles comportent 150 éléments pesant chacun plus de 5 tonnes et dont le bac a 3,2 m de longueur, 0,55 m de largeur et 1,27 m de hauteur. La capacité d'un élément est de 25 000 Ah à la décharge en 10 h. L'intensité de décharge peut atteindre 11 000 A pendant une heure.

L'emploi si étendu des batteries de secours aux Etats-Unis, met en lumière un des caractères de la mentalité américaine, celui de discerner clairement en toutes choses l'intérêt général et d'appliquer immédiatement les moyens connus d'atteindre ce but.

On pourrait être, en effet, tenté de croire que si les Compagnies de distribution américaines font de telles dépenses en batteries de secours, c'est qu'elles y trouvent leur compte en évitant ainsi le paiement de pénalités en cas de panne. Il n'en est absolument rien, les contrats ne prévoyant aucune pénalité dans ce cas.

Digitized by Google

Sans vouloir multiplier les exemples, nous dirons encore que le réseau de Berlin dispose de 69 grosses batteries d'accumulateurs, capables d'assurer pendant une heure une puissance de 78 000 kW, correspondant à un débit de 700 000 A sous 110 V. Ici, les batteries ne servent pas uniquement de secours, mais assurent le service de pointe du matin. Comme secours, elles seraient capables d'alimenter pendant une heure au moment de la pointe du soir, tout le réseau à courant continu.

On peut penser que cette application des accumulateurs n'intéresse pas les réseaux de distribution à courant alternatif. Il ne faut pas oublier cependant qu'il reste de gros problèmes à résoudre et en particulier celui de l'utilisation du courant en dehors des heures de pointe.

Il est presque superflu de rappeler ici les efforts déjà faits dans cette voie, particulièrement par la Compagnie du Gaz de Lyon et nous admirions au début de cette année les installations de chauffage électrique, présentées par M. d'Aubenton-Carafa, son directeur général, M. Krieger, en mars dernier, vous a parlé de la traction électrique par accumulateurs comme d'un autre moyen d'utilisation de l'énergie électrique pendant les heures creuses. C'est une application sur laquelle nous aurons à revenir.

Nous croyons pourtant que malgré toutes les nouvelles applications que l'on pourra trouver et qui amélioreront incontestablement la courbe journalière de consommation, on aboutira bien difficilement à l'usine génératrice travaillant à puissance constante. Or, cet idéal, la batterie d'accumulateurs peut permettre de le réaliser et nous sommes convaincus que dans bien des cas, elle le réalisera économiquement, malgré la diminution de rendement résultant d'une double transformation d'énergie, cet inconvénient étant de bien peu d'importance lorsqu'il s'agit d'usines hydro-électriques. Nous pouvons dire d'ailleurs, qu'on envisage actuellement en Allemagne cette installation de grosses batteries d'accumulateurs sur les réseaux à courant alternatif.

Mais si les batteries d'accumulateurs installées dans les stations centrales ou dans leurs sous-stations, résolvent à la fois le problème d'égalisation de la puissance des usines génératrices et celui de la sécurité, il existe une autre solution qui donnerait encore plus d'efficacité à la sécurité, ce serait l'installation des batteries chez les particuliers eux-mêmes ou pour des groupes de particuliers. Ainsi non seulement, on éviterait les interruptions de courant provoquées par des

Digitized by Google

avaries de machines, mais aussi celles provenant d'accidents à la canalisation.

Cette solution aurait comme autre avantage celui de réduire considérablement les frais d'installation des canalisations pour une énergie déterminée, puisque l'intensité presque constante prise par une batterie en charge est beaucoup plus faible que l'intensité maximum d'utilisation, que doit pouvoir supporter actuellement la canalisation. Ou encore, elle permettrait, pour une ligne existante, d'augmenter considérablement l'énergie distribuée.

Que faudrait-il pour encourager le développement de ces batteries ? D'abord que la Compagnie de distribution consentît à l'usager qui les utiliserait une réduction suffisante sur le prix normal du courant. Ensuite qu'il y eût pour cet usager des possibilités d'arrangement dans le cas où il ne pourrait pas supporter immédiatement les frais supplémentaires d'installation.

Dans certains cas, par exemple lorsqu'il s'agit de longues lignes, dont l'amortissement vient grever par trop le prix de revient du kilowatt-heure distribué, les Compagnies de distribution elles-mêmes pourraient avoir intérêt à installer des batteries dans des sous-stations recevant l'alternatif à haute tension et à faire la distribution à courant continu. Il y a évidemment là des cas d'espèce à étudier.

Sur un réseau à courant continu, si l'usager achète le kilowatt-heure au prix P, celui-ci lui reviendra définitivement à $P' = \frac{P}{\eta} + a$ η étant le rendement en énergie de la batterie et a les charges financières dues à la présence de celle-ci et rapportées au kilowatt-heure.

Dans une conférence faite à la Société Française des Electriciens en décembre 1924, nous avons donné, à titre indicatif, quelques valeurs admissibles pour ces différents coefficients.

Si le prix P' ainsi obtenu n'est pas sensiblement plus élevé que le prix de vente normal du kilowatt-heure aux clients ordinaires, l'usager pourra préférer la solution avec batterie, qui lui donne avec la sécurité, la possibilité de débits momentanés, beaucoup plus élevés que s'il utilisait directement le courant du réseau.

La Compagnie de distribution bénéficiera à son tour d'une bien meilleure utilisation et de son matériel-machines et de ses canalisations, ce qui se traduira par une intéressante réduction du prix de revient de l'énergie électrique. Bien entendu, dans le cas où le courant primaire disponible serait du courant alternatif, il faudrait remplacer

Digitized by Google

dans la formule ci-dessus η par $\eta\eta'\eta'$ étant le rendement de la transformation du courant alternatif en courant continu.

b) *Batteries transportables.* — Nous ne ferons que signaler en passant, l'application des batteries d'accumulateurs à l'éclairage des trains, bien qu'elle se soit beaucoup développée dans ces dernières années, parce que c'est un problème simple et depuis longtemps résolu. Le poids et l'encombrement n'étant pas très limités, on emploie le plus souvent des accumulateurs au plomb à plaques robustes, comme dans les éléments stationnaires. L'accumulateur fer-nickel plus léger que ces derniers, a trouvé là également des applications et nous signalerons aussi la tendance actuelle à employer les nouveaux types d'accumulateurs au plomb légers et à grande durée, que nous étudierons plus en détail tout à l'heure à propos de la traction.

Une des applications qui a le plus prospéré depuis quelques années, est celle de la batterie de démarrage et d'éclairage des voitures automobiles. C'est qu'en effet, on ne construit pour ainsi dire plus de voitures à moteur à explosion sans démarrage électrique.

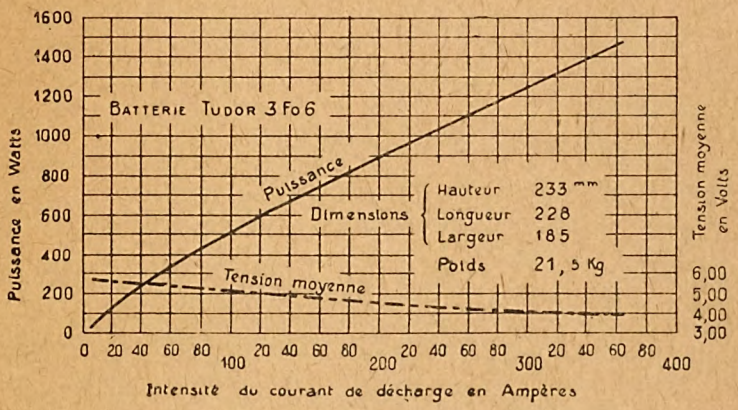


Fig. 1. — Courbe relative à une batterie de démarrage.

Ici, l'accumulateur au plomb est le seul employé. Il n'existe pas d'accumulateur pouvant rivaliser avec lui au sujet de l'aptitude aux décharges rapides, et ceci grâce à sa très faible résistance intérieure. La courbe de la figure 1 illustre bien cette aptitude. On y voit qu'une batterie de 3 éléments dont l'intensité normale de décharge, correspondant à la décharge en 10 heures, est d'environ 7 A, peut débiter plus de 350 ampères, c'est-à-dire plus de 50 fois son intensité normale et donner une puissance utile correspondante supérieure à 35 fois la puissance normale.

Digitized by Google

Grâce à la T. S. F., les applications des petits éléments transportables se sont aussi très étendues et c'est surtout l'accumulateur au plomb qui est employé par suite de ses qualités techniques et économiques. Les batteries sont utilisées les unes pour le chauffage des filaments des lampes (batteries de 4 V et en général de 20 à 80 Ah), les autres pour l'alimentation du circuit-plaque des lampes triodes (batteries de 40, 80 V ou plus et en général de 1 à 3 Ah).

A propos de ces petits éléments, nous accorderons une mention spéciale à un accumulateur particulier que l'on désigne sous le nom d'accupile. Malgré les avantages généraux des accumulateurs électriques sur les piles aussi bien au point de vue technique qu'au point de vue économique, il restait jusqu'ici des applications dans lesquelles les accumulateurs ne pouvaient pas remplacer les piles. Nous voulons parler des cas particuliers où l'on ne dispose pas commodément d'énergie électrique pour la recharge des batteries d'accumulateurs. S'il s'agit alors d'applications ne nécessitant que des courants faibles, les piles sont parfaitement capables de les assurer et ces piles peuvent rester en service pendant de nombreux mois sans soins particuliers. Au contraire, les accumulateurs électriques ordinaires ne peuvent pas être conservés très longtemps en service, même lorsqu'on ne leur demande que de faibles intensités, parce que leurs actions locales correspondent souvent à un nombre d'ampère-heure plus élevé que la capacité utilisable. De tels accumulateurs laissés à l'état de repos, c'est-à-dire n'ayant à fournir aucun courant extérieur, s'épuiseraient complètement en peu de mois. Par conséquent, même avec de petits débits, il n'est pas possible de les utiliser, si l'on n'a pas la possibilité de les recharger assez fréquemment. Il faut, d'autre part, les choisir de capacité très supérieure à celle qui est nécessaire pour l'application que l'on a en vue, à cause de ces pertes importantes par actions locales.

L'utilisation des accumulateurs dans ces applications spéciales était donc liée au problème de la diminution des actions locales.

Ce problème a été résolu avec les accupiles. Ce sont des accumulateurs au plomb de construction spéciale, avec plaques très épaisses.

Dans les accumulateurs ordinaires au plomb, une perte de capacité de 1 pour cent par jour est considérée comme très normale et est en fait à peu près sans inconvénient pratique puisque ces appareils sont appelés à fournir leur décharge complète en très peu de jours et même souvent en une seule journée.

Dans l'accupile, cette perte est ramenée normalement à environ

Digitized by Google

30 pour cent en six mois et il est possible de laisser un accupile isolé pendant un an après sa charge et d'obtenir encore 66 à 67 pour cent de sa capacité (voir la figure 2).

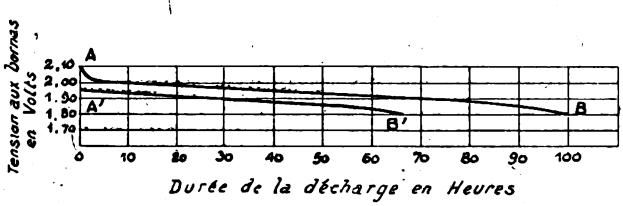


Fig. 2. — Courbes de décharge d'un accupile.
AB décharge suivant immédiatement la charge.
A'B' » faite un an après la charge.

Comme l'accupile a, sur les piles ordinairement employées, l'avantage d'une tension de décharge beaucoup plus élevée et beaucoup plus constante et comme, d'autre part, il fournit dans un grand nombre de cas une solution plus économique que la pile, ses applications sont nombreuses. Nous citerons notamment les sonneries électriques et signaux d'appel, la téléphonie, la télégraphie, la signalisation des chemins de fer, les horloges électriques, les batteries de chauffage des filaments de lampes de T. S. F. etc..., et d'une manière générale toutes les applications à courant faible pour lesquelles la recharge n'est possible qu'à des intervalles très éloignés.

Une application dont le développement paraît devoir devenir considérable est celle des accumulateurs à la traction, question dont M. Krieger vous a déjà entretenus ici en mars dernier.

On sait que dans cette application, l'accumulateur fer-nickel a trouvé sa place à côté de l'accumulateur au plomb. Nous ne reviendrons pas ici sur les qualités respectives des deux types d'éléments, cette question ayant été déjà traitée par ailleurs et notamment dans nos communications de décembre 1924 et d'octobre 1926 à la Société Française des Electriciens.

Ce qu'il faut proclamer hautement, c'est que ces accumulateurs dans leur état actuel permettent de résoudre économiquement de nombreux problèmes de traction.

Bien des gens s'imaginent encore actuellement que le développement de la traction par accumulateurs est lié à la découverte d'un élément plus léger que ceux que nous connaissons.

C'est une erreur et si nous faisons la supposition que l'on découvre demain un accumulateur deux ou trois fois plus léger, par exemple, que ceux actuels, aucun avenir ne peut lui être réservé s'il n'est pas

Digitized by Google

économique. Que ce soit au contraire, un accumulateur, non pas plus léger mais plus économique, et toutes les applications que nous entrevoyons et qui sont déjà réalisées dans d'autres pays lui seront certainement réservées. Ne nous lassons donc pas de le répéter : le problème de la traction par accumulateurs est avant tout un problème d'ordre économique et les accumulateurs actuels permettent de le résoudre.

D'ailleurs nos possibilités, en ce qui concerne la légèreté sont beaucoup plus grandes qu'on ne l'imagine en général. Nous rappellerons à ce sujet qu'on a fabriqué des accumulateurs au plomb donnant 50 watt-heures par kg d'élément à un régime de décharge en une dizaine d'heures. Si nous supposons une camionnette électrique consommant en moyenne dans Paris 65 Wh par tonne-kilomètre (on a pu descendre jusqu'à 55 Wh sur des camions de plus de 2 tonnes de charge utile) équipée avec une telle batterie pesant 35 pour cent du poids total en ordre de marche, le parcours total que pourrait effectuer un tel véhicule sans recharge serait d'environ 270 km à la vitesse moyenne de 27 km à l'heure.

Inversement, si l'on se donne le parcours limite de 80 km à une vitesse un peu inférieure à 20 km à l'heure, correspondant sensiblement aux besoins pratiques d'une journée de fonctionnement d'une camionnette dans une ville, on trouve qu'il suffirait de monter une batterie du type ci-dessus ne pesant que 13 pour cent du poids total.

Il n'est donc pas besoin d'accumulateurs aussi légers pour résoudre les nombreux problèmes de traction qui se posent en première ligne : camionnage des villes, électrobus, taxis, chariots et tracteurs d'usines et de gares, etc., pour la traction sur route, locomotives de manœuvre, locomotives de mines, automotrices, etc., pour la traction sur rail. Des éléments plus robustes et d'une énergie massique même un peu inférieure à 20 Wh par kg (au régime de 5 heures) peuvent suffire, puisqu'avec eux la camionnette ci-dessus n'aurait besoin que d'un poids de batterie égal à 26 pour cent de son poids total pour assurer 80 km et le gros camion, seulement 11 pour cent pour un parcours de 40 km.

Qu'avec les accumulateurs actuels la traction électrique par accumulateurs soit plus économique que la traction par moteurs à essence, la preuve en est faite depuis longtemps et M. Chalumeau vous l'a donnée dans votre belle ville par une exploitation d'électrobus qu'il a si rationnellement organisée. Et cependant tel qu'il était posé, le problème était un des plus difficiles de la traction par accumulateurs.

Digitized by Google

Est-il besoin de rappeler ici que les Américains, gens pratiques et grands réalisateurs, ont constaté que le camionnage électrique dans les villes procure sur le camionnage à essence une économie allant de 25 à 50 pour cent suivant les cas, toutes dépenses comprises. Aussi la traction par accumulateurs s'y développe-t-elle rapidement. En 1925, on comptait déjà aux Etat-Unis comme véhicules à accumulateurs 15 000 camions, 15 000 chariots d'usines, 3 000 locomotives (principalement locomotives de mines).

M. Kriéger vous parlait de l'intérêt du développement de la traction par accumulateurs pour les Compagnies productrices d'énergie électrique, notamment en ce qui concerne l'utilisation pendant les heures creuses.

Les Américains ont parfois des manières très originales et très saisissantes d'illustrer l'importance de ce mode de traction pour les Compagnies distributrices. Nous nous souvenons notamment d'une gravure représentant la faible surface d'un garage de 275 camions électriques (chiffre modeste lorsqu'on le compare aux 1 800 camions électriques de l'American Railway Company) qui ne coûte à la Compagnie distributrice qu'une installation et qui équivaut, comme consommation d'énergie aux 3 000 à 4 000 abonnés particuliers d'une rue de 40 kilomètres de longueur.

Des tableaux donnaient encore les comparaisons suggestives suivantes :

	Temps moyen d'utilisation par semaine.
Camion électrique	30 heures.
Fer à repasser	3 »
Nettoyage par le vide	2,5 »
Machine à laver	2 »
Percolateur	1,6 »
Gril pour toast	1 »

Un camion électrique consomme en moyenne autant que :

760 tapis-chauffants
500 machines à coudre
510 machines à laver
125 fers à repasser.

En terminant, M. Jumau parle de l'accumulateur Ironclad qu'il a décrit au cour de la semaine de discussions d'octobre 1926. Nous renvoyons le lecteur au *Bulletin de la Société française des Electriciens*, t. VI, 4e série, n° 64, décembre 1926.

Digitized by Google

RÉPONSE DE M. FÉRY

à la note de M. JUMAU

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt la conférence de M. Jumau que vous avez bien voulu me communiquer.

Je suis tout à fait d'accord avec M. Jumau pour reconnaître les qualités de l'accumulateur Ironclad, et aussi de l'accupile construits par la Société Fudor sous les soins de M. Jumau; ces éléments sont bien appropriés aux usages auxquels ils sont destinés.

Je partage également les idées de M. Jumau au sujet de l'accumulateur Almeida. La seule nouveauté de cet accumulateur me semble résider dans l'addition d'argent divisé dans la masse de charbon constituant l'électrode positive, mais on peut se demander si cette addition n'entraîne pas de gros inconvénients; les sels Nalogénés de l'argent sont en effet assez solubles dans l'électrolyte employé, et il est vraisemblable de supposer que ce métal viendra se déposer sur l'électrode de zinc.

Or, on sait combien la présence de métaux étrangers augmente l'usure locale dans les piles; le plomb par exemple bien que ne donnant que 0,5 V avec le zinc, produit déjà des couples parasites très nuisibles, et on peut se demander si l'argent qui donne une tension double, ne sera pas encore plus à redouter.

La combinaison si remarquable de Planté, est la seule jusqu'ici qui échappe complètement à cette critique, grâce à l'identité du métal à ses deux électrodes.

Je vois d'autre part que M. Jumau fait bon marché des résultats cependant si nets auxquels m'a conduit l'analyse des matières actives de l'accumulateur au Pb et les nombreuses expériences et mesure que j'ai faites de 1916 à 1919 sur cet élément (1).

Cette longue étude expérimentale m'a amené à la conviction absolue que la théorie de la double sulfatation est inexacte, et que l'équation que j'ai donnée représente exactement les phénomènes chimiques qui se produisent à la charge et à la décharge dans la matière active.

---

(1) Recherches sur le fonctionnement chimique de l'accumulateur au Plomb, Bull. Société Chimique de France, t 35, p. 223, 1919 et Bull. Société Française des Electriciens.

Digitized by Google

M. JUMAU est, comme tous nos anciens élèves de l'Ecole de Physique et de Chimie, un expérimentateur habile, les mesures qu'il a faites dans les laboratoires de la Société pour le Travail Electrique des Métaux, et qu'il a relatées dans son bel ouvrage, *Les accumulateurs électriques*, le montrent bien.

Il est bien regrettable que ses occupations industrielles et commerciales actuelles ne lui laissent pas le temps de reproduire mes propres essais, car il pourrait ainsi se convaincre lui-même de l'exactitude de ma théorie.

Je sais d'ailleurs que des expériences dans ce but se font en Italie; tôt ou tard la vérité se fait jour.

Espérons, d'autre part, que ce sujet si intéressant tentera un jeune chimiste désireux de faire une thèse de Chimie-Physique, dont les conséquences industrielles peuvent être très importantes en conduisant à des perfectionnements qui augmentent encore la qualité de l'accumulateur actuel.

Quant aux mesures basées sur les variations de poids des plaques pendant la charge et la décharge, elles ne présenteront jamais une certitude aussi grande que celle résultant d'analyses chimiques.

Trop de causes d'erreurs en effet interviennent, et il est probable que les résultats obtenus par M. CHENEVEAU et moi-même auraient été plus conformes à la vérité, s'ils avaient porté sur des plaques épaisses comme celles de l'accupile, au lieu de plaques extra minces de 2 mm d'épaisseur servant aux accus de démarrage.

Ma conviction est que les phénomènes perturbateurs qui produisent du sulfate plombique, tant à la positive qu'à la négative, sont dus à une *action superficielle* (réduction exagérée de la position à la surface par suite de l'action hydrogénante des négatives voisines, et oxydation superficielle du sulfate plombeux résultant de l'action oxydante de l'air et des positives).

On peut remarquer, en effet, que la surface de matière active exposée à ces actions parasites est, pour l'unité de poids de cette matière active, en *raison inverse de l'épaisseur des plaques* (en négligeant la surface de la tranche).

La présence de gaz occlus dans la matière active, les différences de concentration du liquide occlus avec le liquide extérieur, l'ignorance où nous sommes de la véritable densité des produits fermés, sont autant de facteurs qui rendent ces mesures incertaines.

Seules des analyses chimiques effectuées sur les matières actives avant et après décharge, et en s'entourant des précautions que j'ai in-

Digitized by Google

diquées dans la Conférence que j'ai faite sur ce sujet devant la Société de Chimie Industrielle en juin 1927, permettraient de trancher la question.

C'est perdre son temps que d'éterniser une discussion sans y apporter le seul concours irréfutable : l'analyse chimique.

RÉPONSE DE M. JUMAU
à la note de M. FÉRY

Dans sa note ci-dessus, M. Féry me fait le reproche de ne pas tenir compte des résultats, cependant si nets, dit-il, auxquels l'a conduit l'analyse.

J'avoue que la netteté de ces résultats ne m'a pas paru frappante puisqu'après avoir indiqué que l'analyse donnait pour la matière active positive chargée la formule Pb^3O^7. C. Féry en concluait que cette matière active positive devait être le Pb^2O^5.

Mais je reconnais bien volontiers que dans les travaux de C. Féry et C. Cheneveau, il y a deux faits à retenir car ce sont des résultats d'expériences : l'analyse de la matière active et la détermination de la variation du poids dans les électrodes pendant la décharge.

Je suis donc tout à fait d'accord avec M. C. Féry pour estimer intéressant de répéter ses essais analytiques et déterminer si réellement, dans certaines conditions, on peut obtenir un oxyde supérieur à PbO^2 et si cet oxyde est bien Pb^2O^5.

Mais tant que cette preuve ne sera pas faite, tant que la théorie C. Féry ne sera fondée que sur de pures hypothèses et tant que cette nouvelle théorie sera en désaccord avec quantités de faits expérimentaux, je dis qu'il ne pourra être question de la substituer à la théorie de la double sulfatation qui, elle, les explique.

Quant au reproche d'éterniser une discussion, je pense ne pas le mériter lorsque je ne fais que répondre au désir exprimé par nombre de personnes et de groupements, si naturellement désireux de se renseigner. Ce désir est bien compréhensible lorsqu'on a lu sous la plume d'un savant aussi autorisé que C. Féry, que désormais sa nouvelle théorie doit remplacer la théorie classique de la double sulfatation.

Ceci dit, je suis convaincu que mon ami C. Féry ne m'en voudra pas d'exprimer aussi franchement mon opinion, car il sait très bien quelle profonde estime j'ai pour sa personne et quelle admiration je professe pour ses autres travaux.

Digitized by Google

INFORMATIONS
DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Remise à M. Paul Janet du produit de la souscription pour la création de secours d'études.

Le 8 décembre 1927, dans le nouvel amphithéâtre de l'Avenue Pierre Larousse, M. Ch. FABRY, Président de la Société Française des Electriciens, entouré des collaborateurs de M. JANET, des anciens Présidents, des membres du Bureau, du Comité et de la Société Française des Electriciens, du Président et des membres de l'Association Amicale des Anciens Elèves de l'Ecole Supérieure d'Electricité, des Elèves de la promotion actuelle, remit à M. Paul JANET, membre de l'Institut, Directeur de l'Ecole Supérieure d'Electricité, le produit de la souscription ouverte en son honneur.

Le montant obtenu, atteignait à cette date, 51.000 fr., il a dépassé, depuis, 60.000 fr.

M. Ch. FABRY rappela que le Bureau de la Société avait projeté d'offrir un objet d'art à M. JANET pour commémorer son élévation à la dignité de Commandeur de la Légion d'Honneur. M. JANET, consulté sur la date de la remise, exprima le vœu de voir substituer à ce souvenir la création d'un secours d'études au profit d'un de ses élèves. Le succès obtenu témoigne de la manière dont fût apprécié le geste de M. JANET, et M. FABRY se proclama très heureux de lui remettre la liste, très longue, des souscripteurs.

M. IGLESIS, Président de l'Association Amicale des Anciens Elèves de l'Ecole Supérieure d'Electricité, exprima à son tour les sentiments de profonde gratitude et d'admiration qu'ont voués, à leur ancien maître, tous ceux qui ont eu le privilège envié de recevoir son enseignement.

M. JANET remercia en termes très émus les souscripteurs, trop nombreux pour qu'il pût les nommer tous, puis, pour employer ses propres termes, comme les enfants de l'Oiseau Bleu évoquant l'image aimée de leurs grands-parents, il fit revivre le souvenir de quelques anciens Présidents de la Société, aujourd'hui disparus, qui l'avaient soutenu de leurs conseils et de leur sympathie : Mascart, Hospitalier, Fontaine, Potier, Hillairet.

Il se félicita d'avoir amené à son plein développement cette Ecole à laquelle il a consacré sa vie et il termina en remerciant chaudement les souscripteurs d'avoir si généreusement répondu à son appel et apporté ainsi un secours efficace à de jeunes camarades traversant une période difficile.

Digitized by Google

TRAVAUX DES SECTIONS

SOMMAIRE

1re Section. — Détermination d'un programme d'étude des moteurs électriques de laminoirs (M. Grivet), p. 1450 — (M. Le Monnier, M. Dubertret, M. Tautant), p. 1453.
Le calcul des courants de court-circuit des réseaux en fonction du temps (MM. Darrieus et Fallou), p. 1454.
Mode d'excitation des alternateurs à grande puissance et à forte réaction d'induit (MM. Fallou, Boucherot, Le Monnier, Darrieus), p. 1456. — Détermination graphique des harmoniques des fonctions périodiques (MM. Mathieu, Boucherot, Darrieus), p. 1465.
2e Section. — Compte rendu du Congrès International de Bellagio, p. 1471.
Eclairage des ateliers de composition d'imprimerie (M. Wetzel), p. 1475.

1re SECTION. — PRODUCTION ET UTILISATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ

Présidence de M. Girault.

Séances des 7 novembre et 2 décembre 1927. — Ier Détermination d'un programme d'étude de moteurs électriques de laminoirs.

1. — M. Grivet, Ingénieur en Chef du Service Electrique de la Société des Hauts-Fournaux, Forges et Aciéries de Denain et d'Anzin, présente une note qui peut se résumer comme suit :

1° Il n'est pas aujourd'hui de directeur d'usine métallurgique qui voudrait revenir à la machine à vapeur après avoir connu le moteur électrique.

Le laminoir tire en effet du moteur électrique les principaux avantages suivants :

économie dans le laminage ;

fixité de la vitesse qui conduit à une production plus régulière et à un laminé de tenue toujours égale ;

souplesse pour passer les pointes, les changer de vitesse, les arrêter, les démarrer ;

possibilité de contrôle du laminage.

Mais, par contre, le moteur électrique de laminoir ne doit pas présenter la moindre défaillance, car la moindre réparation de moteur entraîne l'arrêt complet de tout l'atelier de laminage, d'où perte d'argent considérable et trouble dans l'usine entière, tous les ateliers de laminage se commandant plus ou moins les uns les autres.

Le moteur électrique de laminoir doit donc être caractérisé par sa robustesse et sa simplicité.

Digitized by Google

Ces qualités primordiales passent bien avant le rendement ; elles permettront au moteur de supporter les poussières métalliques conductrices et magnétiques en atmosphère chaude, les chocs, les vibrations provenant du laminoir lui-même, organe mécanique encore bien fruste et grossier et qui est loin d'avoir suivi le progrès de la mécanique en général.

Or, les constructeurs de moteurs de laminoirs ont, du premier coup, réussi la fabrication de cet engin délicat et robuste et c'est là un beau titre de gloire ; ils ont même réalisé le moteur le plus difficile à réaliser, le moteur réversible. Ce dernier fait aujourd'hui l'émerveillement des lamineurs.

Quant au moteur de laminoir irréversible à une seule vitesse, il est devenu aujourd'hui presque standard ; c'est l'outil le plus simple et le plus sûr. Il reste toutefois encore à mettre au point les moteurs irréversibles à plusieurs vitesses.

Les solutions se présentent nombreuses comme les remèdes de certaines maladies. C'est l'indice qu'il y a là un champ bien vaste encore pour les chercheurs, mais le danger réside ici dans la complexité. Et le collecteur que chacun voudrait voir disparaître, réapparaît ici encore, sinon sur le moteur principal, du moins sur les organes auxiliaires.

Comme conséquence, le moteur du laminoir devra être construit très largement au double point de vue mécanique et électrique, parce qu'il subit des couples résistants essentiellement et rapidement variables.

La résistance du métal au laminage varie, pendant l'opération du simple au double et même au triple et fait varier dans la même proportion les couples demandés au moteur.

Un moteur de laminoir devra donc pouvoir supporter des surcharges importantes. Il est admis aujourd'hui que sa puissance nominale taxée est celle correspondant à une marche continue, sans arrêt, et qu'il peut subir momentanément une puissance double sans aucun inconvénient.

Ce qui est moins simple, c'est de définir la puissance nominale d'un moteur destiné à entraîner tel train, fabricant tel produit, avec une production de tant de tonnes à l'heure.

C'est ici que nous sommes dans l'à-peu-près. Nous manquons de renseignements. Nous sommes dans une période transitoire, intermédiaire entre l'emploi exclusif de la vapeur, et celui de l'électricité. En substituant au moteur à vapeur le moteur électrique, on a déterminé la puissance nominale de ce dernier avec beaucoup d'approximation. Dans certains cas, il s'est trouvé trop faible, dans d'autres cas, trop fort.

Mais les mesures exactes d'énergie et de puissance que l'on peut faire aujourd'hui permettent de réunir une documentation sur le laminage de chaque profil et faciliteront de beaucoup la tâche des constructeurs de demain.

Le moteur électrique de demain, s'il doit être évidemment mieux adapté que celui d'hier, devra néanmoins être dimensionné largement.

Digitized by Google

Nous pensons aussi qu'une évolution se fera vers la simplification des vitesses, que le laminoir irréversible à volant, par exemple, de plus en plus spécialisé pour une série de produits restreinte, sera mieux utilisé comme puissance et comme volant. Un laminoir irréversible, à grande échelle de vitesses, utilise mal son volant dans les petites vitesses, alors qu'il lamine des produits plus lourds exigeant un couple plus fort.

Programme proposé par M. Grivet pour l'étude des moteurs de laminoirs.

L'étude se diviserait en deux chapitres :

Chapitre premier. — Laminoirs irréversibles.
Chapitre deuxième. — Laminoirs réversibles.

Subdivision du chapitre 1er :

a) laminoirs irréversibles à volant à une seule vitesse à vide.
b) laminoirs irréversibles à volant à une infinité de vitesses à vide, dont le maximum et le minimum sont entre eux comme les nombres 100 et 70.

Il y aurait lieu d'examiner :

Dans la catégorie *a*) :

1° l'influence du volant ;
2° l'importance du glissement ;
3° la caractéristique idéale de glissement ;
4° la comparaison des différents types de moteurs réalisés :
à courant continu compound ;
à double caractéristique shunt ;
à courant triphasé normal ;
à courant triphasé à résistance rotorique variable ;
à courant triphasé en cascade avec moteur à collecteur.

Dans la catégorie *b*) :

la comparaison des différents types de moteurs réalisés :
à courant continu (variation par le champ) ;
à courant triphasé à marche sous-synchrone ;
à dispositif Krœner ;
à dispositif Scherbius ;
à dispositif Jeumont (moteur cascade) ;
à marche sur et sous-synchrone ;
à dispositif Brown-Boveri ;

le cas particulier des laminoirs irréversibles *sans volant* qui tendent à se répandre et qui comprennent :

les trains Morgan ;
les trains à fil ;

Digitized by Google

certains trains finisseurs à passes longues, avec adoption soit du moteur asynchrone sans glissement, soit du moteur synchrone.

Subdivision du chapitre 2e :

1° description type d'un ensemble de groupe Léonard Ilgner et de moteur reversible ;

2° examen des caractéristiques spéciales de cet ensemble :

a) mode de glissement du moteur de commande du groupe Léonard ;

b) mode d'excitation rapide, des génératrices du groupe Léonard pour l'obtention des accélérations rapides du moteur de laminoir.

2. — M. Le Monnier expose les avantages du moteur synchrone synchronisé sans volant appliqué aux trains de laminoirs : il permet d'augmenter la rapidité des passes et d'augmenter de 20 à 25 pour 100 la production du train ; d'autre part, il démarre avec un courant égal à la moitié du courant de pleine charge et fonctionne avec un facteur de puissance égal à l'unité, même dans le cas de machines lentes.

3. — M. Dubertret. — Nous avons eu l'occasion de nous mettre en rapport avec certains établissements laminant divers métaux : nous avons retenu à ce sujet la suggestion faite par M. Rieunier d'étendre l'étude aux laminoirs de petits métaux.

Il semble possible d'obtenir de ces exploitants des renseignements assez précis sur les puissances requises pour le laminage de tel ou tel échantillon. Néanmoins, ces renseignements sont donnés, en général, sous réserve que les précisions ne puissent profiter à la concurrence. Il convient donc de les reproduire sous une forme impersonnelle et de chercher avant tout à y puiser la documentation que nous voulons constituer.

D'une façon générale, la détermination de la puissance, dans des cas particuliers, semble parfaitement possible. Par contre, les fabrications des différentes maisons, sont en général, essentiellement variables et dans des limites telles que pour être sûrs de ne pas être bloqués, les exploitants commandent des moteurs de puissance assez souvent très supérieurs à celle qui est nécessaire dans la fabrication courante.

La diversité porte sur les points suivants :

la nature du métal, les profils, la température du métal, la succession des passes, la production.

On voit, par cette simple énumération, que la régularité des fours et celle de la manutention sont des facteurs de première importance pour la détermination des puissances à prévoir.

Il nous a paru que, même dans des fabrications assez spécialisées, les diversités étaient assez grandes pour entraîner l'exploitant à adopter des marges de puissances excessives.

La condition primordiale de la réduction de la marge serait donc la réduction des types divers de fabrication qui serait possible par une entente

Digitized by Google

entre les divers fabricants, de manière que ceux-ci se répartissent la fourniture des profils divers. Dans l'état actuel des choses, on peut dire qu'un abîme sépare le choix commercial de la puissance de sa détermination dans un cas particulier. Pour employer l'expression d'un fabricant, la détermination actuelle est affaire d'opportunité.

4. — M. TAUTANT, Ingénieur à l'Electro-Cable, expose les détails de l'installation d'un laminoir de cuivre et il indique les modifications successives qui y ont été apportées pour en augmenter le rendement. Le train équipé avec un moteur série de 400 ch, produisait, en 1911, 20 T par jour. Actuellement, équipé avec un moteur asynchrone de 550 ch attaquant directement à la vitesse de 500 t : m et avec un moteur de 70 ch au train ébaucheur, il produit 60 T par jour.

5. — La section décide de demander à M. GRIVET de bien vouloir rassembler une documentation aussi étendue que possible sur les puissances mises en jeu par le laminage. M. LE MONNIER accepte de traiter le point particulier relatif à l'application des moteurs synchrones aux laminoirs.

IIº CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT DES RÉSEAUX EN FONCTION DU TEMPS.

M. DARRIEUS. — La détermination de la puissance de rupture à donner aux interrupteurs à huile en un point d'un réseau comporte le calcul, en fonction du temps, des courants de court-circuit en ce point. Si cette détermination peut être considérée en principe comme classique, notamment depuis les beaux travaux présentés par M. BOUCHEROT au Congrès de TURIN, et ici même en 1910-1911, son application n'est pas encore véritablement entrée dans la pratique, malgré l'importance croissante des problèmes que pose aux exploitants la croissance des réseaux.

Aux Etats-Unis, l'accord paraît s'être fait généralement parmi les constructeurs, sur l'emploi d'un réseau de courbes proposé dans un mémoire de E. M. HEWLETT, J. M. MAHONEY et G. A. BURNHAM, présenté le 15 février 1918 à l'AMERICAN INSTITUTIONE OF ELECTRICAL ENGINEERS.

Ces courbes, établies d'une manière empirique par analyse d'oscillogrammes relevés sur un certain nombre de machines de construction normale sont censées représenter chacune une moyenne convenable pour tous les cas dans lesquels la réactance relative totale du circuit, ramenée à la puissance des machines synchrones en service, possède une valeur donnée. Elles donnent la loi de décroissance en fonction du temps de la moyenne quadratique du courant au cours d'une période entière, c'est-à-dire de la racine carrée de la somme des carrés de la composante continue et de la valeur efficace de la composante alternative de la surintensité, en supposant la composante continue maximum.

Digitized by Google

Cette manière de faire, qui a pour elle d'être devenue aux Etats-Unis d'un usage courant, nous paraît critiquable pour les raisons suivantes :

1° Le choix, comme facteur du travail de rupture, d'un courant efficace total, faisant entrer en ligne de compte la composante continue, introduit une complication un peu arbitraire, car si la vérification de la résistance aux efforts électrodynamiques ne saurait dispenser de la considération de la pointe maximum instantanée, il n'est pas prouvé que la présence, dans l'arc, d'une composante continue, rendant le courant total dissymétrique, aggrave les conditions de la rupture, car il se pourrait que l'extinction fût au contraire facilitée par la réduction, au moment du passage par zéro de l'intensité, de la dérivée di : dt et de la tension instantanée de réallumage, comme le montre la figure ci-contre.

2° L'adoption comme paramètre, dans l'unique famille de courbes adoptée, de la seule réactance de fuites totales du circuit, est insuffisante, car l'allure de la décroissance de l'intensité en fonction du temps t, représentée, pour la seule composante alternative, par l'expression :

$$I = (I_0 - I_{cc})e^{-\frac{RT}{N}} + I_{cc}$$

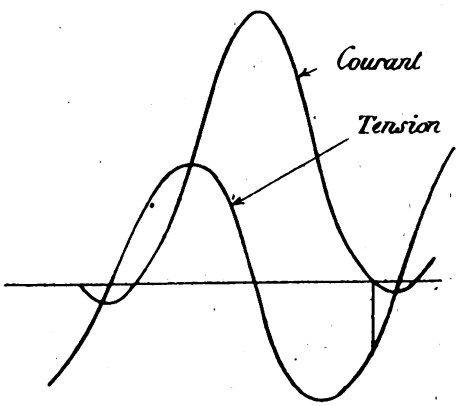


Fig. 1. — Calcul des courants de court-circuit.

dépend en principe des 3 paramètres indépendants : I_0, valeur initiale du courant de court-circuit symétrique, I_{cc} courant permanent de court-circuit, et N : R constante de temps du circuit inducteur. Ainsi, il est manifeste que la réactance totale de fuites N, dont dépend le courant I_0 et l'amortissement caractérisé par N : R n'ont aucune relation *à priori* avec la réactance totale L, qui dépend, entre autres facteurs, de l'entrefer, et qui détermine le courant permanent I_{cc}.

Digitized by Google

Il est vrai que, si les réactances N et L peuvent être facilement calculées à partir des données du réseau et de celles fournies pour les machines par le constructeur, il n'en est pas de même de la résistance R intervenant dans la constante de temps. Dans le cas d'une roue polaire feuilletée, sans amortisseur embrassant la majeure partie du flux inducteur, cette résistance est celle de l'enroulement inducteur seul ; dans le cas usuel de pôles massifs ou munis d'amortisseurs, il faut ajouter, à la conductance correspondante, celle des circuits amortisseurs et des courants de FOUCAULT ; l'expérience montre, en effet, que l'amortissement de la composante alternative est beaucoup moindre que celui que l'on pourrait déduire de la puissance d'excitation. En outre, comme nous l'avons indiqué devant la première Section et comme M. FALLOU l'a développé dans un rapport à la semaine de discussions d'octobre 1925, la dispersion entre inducteur et amortisseur complique la loi de décroissance du flux et du courant, en faisant intervenir deux constantes de temps et deux exponentielles distinctes.

Enfin, suivant une remarque de M. FALLOU, une question plus importante que ces diverses complications, peu accessibles au calcul et sur lesquelles nous ne possédons encore que peu de données expérimentales, est la prise en considération du court-circuit monophasé ou dissymétrique, dont l'importance pratique est beaucoup plus grande que celle du court-circuit polyphasé généralement admis.

Quoi qu'il en soit de ces perfectionnements et sans que nous soyons en mesure aujourd'hui d'émettre aucune proposition définie, il nous paraît désirable qu'une discussion s'engage en France entre exploitants et constructeurs, en vue de l'adoption d'une méthode-type suffisamment approchée mais simple, et dont les côtés arbitraires ou les hypothèses discutables, s'ils sont admis en vue de cette simplicité, seraient du moins nettement mis en évidence et acceptés en connaissance de cause.

M. FALLOU rappelle que la loi de décroissance de la surintensité initiale est différente suivant que le court-circuit a lieu entre une phase et le neutre, entre deux phases ou entre les trois phases. Il demande qu'au cas où des règles de calculs seraient établies, le court-circuit polyphasé symétrique, qui ne se produit que très exceptionnellement dans les réseaux, ne soit traité que comme un cas particulier.

III° MODE D'EXCITATION DES ALTERNATEURS A GRANDE PUISSANCE ET A FORTE RÉACTION D'INDUIT.

M. FALLOU. — Le désir exprimé par les exploitants de réduire à des valeurs acceptables les courants de court-circuit, et la tendance qu'ont les constructeurs à établir des machines puissantes de faibles dimensions, ont fait abandonner depuis longtemps la construction d'alternateurs à faible chute de tension et conduisent actuellement à l'adoption d'une

Digitized by Google

réaction d'induit de plus en plus élevée pour toutes les machines synchrones.

Cette augmentation de la réaction d'induit, nécessaire à certains points de vue, a, par ailleurs, le grave inconvénient de diminuer la stabilité de fonctionnement dans certaines circonstances et requiert, de la part des excitatrices, des qualités spéciales que les constructeurs ne se sont peut-être pas attachés à développer jusqu'à ce jour.

A. — *Excitatrice shunt.*

La génératrice shunt est actuellement la machine la plus couramment utilisée pour assurer l'excitation des alternateurs. Il faut trouver, dans cette généralisation, des raisons d'économie et de simplicité, beaucoup plus que des raisons techniques, car il est facile de démontrer que la dynamo shunt est la génératrice la moins bien adaptée pour remplir le rôle d'excitatrice.

1° Un de ses premiers défauts provient de ce que sa zone de stabilité est relativement réduite, et, généralement plus étroite que la zone de fonctionnement à tension variable nécessaire à la régulation des alternateurs à forte réaction d'induit. Ce premier défaut se trouve d'ailleurs aggravé si, comme il est désirable de le faire pour augmenter la rapidité de la régulation automatique, l'excitatrice est dimensionnée de manière à pouvoir fournir momentanément aux bornes des inducteurs de l'alternateur une tension bien supérieure à la tension maximum utile en régime permanent.

Cette stabilité est améliorée par des dispositifs connus qui consistent à saturer une partie du circuit magnétique, de manière à couder l'origine de la caractéristique à vide, mais ces palliatifs n'ont qu'une efficacité réduite et l'expérience montre que, pour assurer une marche suffisamment stable des alternateurs aux heures de faible charge sur un réseau de capacité élevée, il est nécessaire de brancher, entre l'excitatrice shunt et l'inductance de l'alternateur, un rhéostat de résistance importante qui consomme de l'énergie en pure perte et dont l'installation et l'entretien constituent une sujétion onéreuse.

2° Un second défaut, plus important encore que le premier, provient de la constante de temps excessive de cette génératrice. La dépendance mutuelle de la tension aux bornes de l'excitatrice et de son propre courant inducteur allonge considérablement la durée d'ajustement du flux, même si l'on a pris soin de réduire au minimum la constante de temps propre des inducteurs, et quelle que soit la rapidité d'action des régulateurs automatiques.

Cette constante de temps s'ajoute à celle du circuit inducteur de l'alternateur pour allonger les périodes transitoires et compromet la stabilité de marche de l'alternateur en régime troublé.

3° La dépendance mutuelle de la tension aux bornes de l'excitatrice et

Digitized by Google

de son propre courant inducteur fait dépendre ce dernier des régimes transitoires qui prennent naissance dans le circuit de champ de l'alternateur à la suite des variations brusques dans le régime de ce dernier. En cas de court-circuit brusque, par exemple, le rotor de l'alternateur est le siège de courants transitoires qui tendent à maintenir le flux à sa valeur initiale, et qui se divisent, partie dans l'inducteur, partie dans l'amortisseur. La composante qui circule dans le circuit d'excitation a pour effet d'augmenter brusquement le courant d'excitation ; la tension aux bornes de l'induit de l'excitatrice, sous l'effet de la self inductance de ce dernier, subit alors une chute de tension qui peut avoir pour effet de démagnétiser cette excitatrice, voire même d'inverser sa polarité.

4° Un quatrième inconvénient, inhérent à l'adoption de l'excitatrice shunt, provient de la difficulté d'annuler progressivement le courant d'excitation de l'alternateur et même de l'inverser, comme il peut être nécessaire de le faire, lorsqu'il s'agit de machines à pôles saillants fonctionnant sur des lignes à forte capacité. Cette inversion de polarité ne peut s'effectuer pratiquement que par des dispositifs compliqués adaptés dans le circuit de débit de l'alternateur et ne se prête pas à l'action directe et automatique des régulateurs de tension.

B. — *Excitatrice Compound.*

Le compoundage des excitatrices shunt ne constitue une mesure suffisante, ni pour améliorer la stabilité de ces machines aux faibles tensions, ni pour diminuer leur constante de temps.

On démontre même (1) que, sous l'effet de la mutuelle induction des enroulements série et shunt, les régimes transitoires du courant débité par l'excitatrice peuvent devenir périodiques et que des pompages peuvent survenir entre l'alternateur et son excitatrice.

C. — *Excitatrice à excitation séparée.*

L'emploi de génératrices à excitation séparée, munies de régulateurs automatiques, permet au contraire de supprimer la plupart des inconvénients inhérents à l'emploi des excitatrices shunt. En effet :

1° L'excitation séparée de l'excitatrice permet d'obtenir une stabilité de marche parfaite à tous les régimes, et par conséquent de supprimer totalement le rhéostat de champ principal.

L'économie réalisée sur ce dernier appareil compense largement les frais d'installation de la génératrice auxiliaire servant à exciter l'excitatrice principale.

2° La constante de temps de l'excitatrice ne dépend plus que de la constante de temps de ses enroulements d'excitation, et il est possible

(1) Doherty. Journal of the A.I.E.E. Août 1922.

Digitized by Google

de la réduire considérablement en établissant la machine avec un faible flux utile et en réduisant au minimum le nombre de spires de ses inducteurs, tout en y admettant le courant le plus intense possible qui soit compatible avec le bon fonctionnement des régulateurs automatiques.

3° L'enroulement inducteur étant séparé de l'induit, la tension aux bornes de celui-ci n'est pas affectée par les régimes transitoires dus aux variations brusques de régime de l'alternateur, et l'excitatrice ne risque pas de s'inverser en cas de court-circuit brusque.

4° Un montage potentiométrique très simple du régulateur de tension branché sur l'excitation séparée de l'excitatrice, permet d'inverser automatiquement la polarité de l'excitation de l'alternateur en cas de décharge brusque à l'extrémité d'une ligne à grande capacité alimentée par cet alternateur.

D. — *Excitation série.*

L'idée semble être venue à plusieurs constructeurs (1) d'exciter les alternateurs au moyen de génératrices séries dont on règle le flux inducteur par un enroulement alimenté au moyen d'une source séparée. La mutuelle induction des deux enroulements d'excitation est annulée par un transformateur ad hoc.

L'emploi de ces machines séries a pour but d'annuler la résistance apparente de l'enroulement d'excitation de l'alternateur et de rendre infinie la constante de temps de ce circuit, de telle sorte que les courants qui y prennent naissance spontanément, en cas de variation brusque du régime de la machine, s'y maintiennent indéfiniment.

L'alternateur fonctionne ainsi à chaque instant à flux constant et sa stabilité de marche synchrone, en cas de perturbation sur le réseau, s'en trouve théoriquement grandement améliorée.

Certains dispositifs *Siémens* prévoient d'ailleurs un troisième enroulement d'excitation alimenté à travers un redresseur par la tension de l'alternateur.

Si séduisants à première vue que soient ces dispositifs, ils appellent néanmoins un certain nombre de critiques :

1° Il faut d'abord noter que la cause principale d'instabilité des alternateurs en régime troublé provient des courts-circuits, et que la très grande majorité des décrochages qui se produisent dans les réseaux sont consécutifs à la mise à la terre ou à des contacts entre phases.

Il semble donc que l'examen des régimes transitoires qui accompagnent la mise en court-circuit et la coupure des courts-circuits doit être à la base du problème de la stabilité dynanique et qu'il faille rechercher avant tout dans quel sens l'excitatrice doit réagir dans ce cas particulièrement important.

(1) Brevet français n° 559.129 (Siemens-Shuckert) et 614.122 (Electro-Mécanique).

Digitized by Google

En ce qui concerne la mise en court-circuit, il ne semble pas qu'il soit désirable de prolonger indéfiniment la période transitoire en maintenant constant le flux de l'alternateur, car ceci aurait pour premier effet d'aggraver singulièrement les difficultés d'exploitation des réseaux par l'augmentation du courant de court-circuit permanent.

Par ailleurs, l'allongement de la durée de la surintensité initiale a pour effet de demander au groupe électrogène un supplément de puissance active, susceptible de compromettre la marche au synchronisme et va, par conséquent, à l'encontre du but poursuivi.

La pratique actuelle semble, au contraire, conduire à l'adoption de régulateurs d'intensité qui désexcitent l'alternateur le plus rapidement possible à la suite du court-circuit.

2° Cette objection de principe mise à part, il est facile de démontrer que l'emploi de l'excitatrice série, ne saurait maintenir indéfiniment le flux de l'alternateur à sa valeur primitive.

En effet, d'abord la machine série, pour qu'elle soit stable et pour que son réglage soit possible au moyen de l'enroulement auxiliaire, ne peut pas être prévue de manière à annuler exactement la résistance apparente du circuit d'excitation. D'autre part, les rotors des alternateurs étant toujours plus ou moins amortis, les courants transitoires qui prennent naissance dans l'enroulement d'excitation proprement dit, ne sont généralement qu'une faible partie du courant transitoire total qui tend à maintenir le flux à sa valeur initiale après une variation brusque de régime, et, d'autre part, l'enroulement d'excitation couplé par mutuelle inductance avec l'amortisseur, ne possède pas une constante de temps simple, mais deux constantes de temps notablement différentes.

La machine série ne pourra donc pas maintenir la constance du flux de l'alternateur, mais seulement augmenter, dans une certaine mesure, la durée de la variation de ce flux.

Si l'on examine maintenant les régimes transitoires qui succèdent d'abord à la mise en court-circuit brusque, puis à la rupture de ce court-circuit, il est facile de voir qu'une excitatrice série aura pour effet :

a) de diminuer la rapidité d'abaissement du courant de court-circuit sans pouvoir toutefois empêcher que le flux de l'alternateur ne tombe finalement à la valeur du flux de fuites ;

b) après la rupture du court-circuit, d'allonger d'une manière nuisible la durée de réajustement du flux à sa valeur normale.

Ces deux effets seront de nature à compromettre la stabilité de fonctionnement de l'alternateur plutôt que de l'améliorer.

Conclusions. — Parmi les dispositifs actuellement connus, il semble que l'excitatrice shunt soit la moins bien adaptée à l'excitation des grands alternateurs à forte réaction d'induit.

Digitized by Google

L'emploi d'excitatrices séries se heurte à de graves difficultés et ne semble pas pouvoir satisfaire aux conditions théoriques que l'on voudrait attendre d'elles.

Enfin, la génératrice à excitation séparée, conçue spécialement, semble devoir être préférée à tous les autres dispositifs.

Il y a lieu de noter de toutes manières, et quel que soit le système adopté, que l'on augmentera toujours la rapidité de la régulation, et partant, la stabilité de fonctionnement, en utilisant des excitatrices très largement dimensionnées et capables de fournir momentanément, aux bornes des inducteurs de l'alternateur, des tensions très supérieures (3 ou 4 fois par exemple) aux tensions maxima utiles en régime permanent.

M. BOUCHEROT. — La note de M. Fallou est très intéressante et il n'est pas question ici de la critiquer. Je veux seulement rappeler quelques faits :

1° Quelques-uns des phénomènes signalés l'ont été aussi dans mon rapport au congrès de Turin de 1911, reproduit par M. Brunswick dans le *Bulletin* de la Société de décembre 1911.

2° Certains des inconvénients signalés n'existent pas quand on emploie le compoundage des alternateurs par des *procédés physiques*, au lieu des régulateurs de tension ; j'ai insisté sur ce point il y a 25 ans déjà.

3° La Maison Bréguet a réalisé, à partir de 1900, 400 (et peut-être plus) compoundages d'alternateurs par mon procédé. Ce sont tous des alternateurs à grande réaction. Sur ce nombre, quelques-uns ont été compoundés *par relais*, c'est-à-dire qu'ils sont excités par une excitatrice ordinaire à courant continu dont l'excitation séparée est faite pour un petit groupe de compoundage. Il en est question dans des publications ou catalogues. Elle a même, si je ne me trompe, appliqué le petit groupe compoundeur aux excitatrices de plusieurs alternateurs d'une usine.

M. LE MONNIER. — Les conséquences des tendances actuelles de la construction des alternateurs, sur lesquelles M. Fallou a attiré l'attention en ce qui concerne les excitatrices, sont fort justes et le problème des excitatrices a même un caractère plus général encore que celui qu'il nous a exposé.

En effet, avec l'extension des réseaux, l'emploi des moteurs synchrones a dû se développer, surtout sous la forme de moteurs asynchrones synchronisés, qui, en raison de leur commodité de démarrage, se prêtent à une facile utilisation dans la plupart des cas.

Or, ces moteurs ne *peuvent être réalisés pratiquement* qu'avec des tensions d'excitation relativement faibles. Ces conditions d'emploi rendent les excitatrices d'autant plus sensibles aux défauts de stabilité qu'a signalés M. Fallou, en raison de l'importance que prend la valeur de la chute de tension au contact sur le collecteur par rapport à la tension totale.

Digitized by Google

Quand on veut, en outre, utiliser les moteurs asynchrones synchronisés à charge variable dans de bonnes conditions de rendement, c'est-à-dire sous un facteur de puissance voisin de l'unité à toutes charges, on est amené à employer les excitatrices à tension variable dans une zone assez étendue. Cette zone s'allonge encore quand il s'agit de compensateurs asynchrones synchronisés dont la chute de tension est encore plus grande que celle des alternateurs envisagés par M. Fallou, puisqu'ils fonctionnent en débit purement réactif.

Les constructeurs, et ceux en particulier qui se sont attachés à la réalisation des machines asynchrones synchronisées, n'ont donc pas pu négliger cette question capitale des excitatrices, qui aurait pu devenir l'accessoire fatal d'un dispositif extrêmement intéressant en lui-même.

Je laisserai à d'autres le soin de défendre l'excitatrice série et je voudrais seulement réhabiliter l'excitatrice shunt, que M. Fallou juge avec tant de rigueur.

1° Le principal reproche que l'on puisse être tenté de faire, à première vue, à l'excitatrice shunt, est son manque de stabilité à tension réduite. On dispose, pour parer à cet inconvénient, de deux procédés. Le premier,

Fig. 1. —Caractéristique à vide en feston.

auquel a fait allusion M. Fallou, consiste à employer une excitatrice à caractéristique à vide en « feston ». Si l'on prend une excitatrice dont le circuit magnétique comporte un, ou même plusieurs points de saturation échelonnés sensiblement équivalents (une fois que la saturation y est atteinte), à un

Digitized by Google

entrefer supplémentaire, on obtient une caractéristique à vide ayant l'aspect de la figure 1 et présentant par suite constamment, même pour des tensions réduites, des points d'intersection nets avec une droite passant par l'origine et représentative de la résistance du circuit inducteur.

Ce premier procédé, dont l'emploi est très répandu, donne déjà une stabilité très satisfaisante.

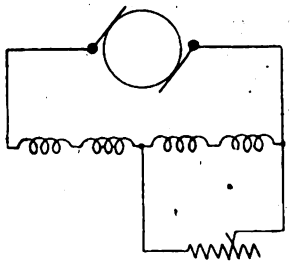


Fig. 2. — Schéma de montage d'une génératrice shunt à 4 pôles avec réglage de la tension à saturation constante.

Mais le second procédé, moins connu, qui réside dans l'emploi d'une excitatrice à « saturation constante », lui est très supérieur. Il consiste à employer une excitatrice multipolaire à p paires de pôles, munie d'un enroulement série sur l'induit, et dont on règle la tension en shuntant p — k paires de pôles, k étant entier et plus petit que p.

Prenons, par exemple, le cas d'une machine à 2 paires de pôles dont l'une est shuntée (schéma de la figure 2). A chaque valeur du shunt, correspond une caractéristique à vide, dont les ordonnées sont sensiblement la somme des ordonnées des caractéristiques à vide élémentaires correspondant à chaque paire de pôles pour les valeurs respectives des courants d'excitation i et $\frac{i}{n}$. Le dénominateur ne peut être considéré comme caractéristique du shunt.

Pour $n = 1$ correspondant à une résistance infinie du shunt, on obtient la caractéristique à vide d'ordonnée maxima réalisable avec ce procédé.

Pour $n = \infty$ on obtient la caractéristique d'ordonnée minima.

Pour toute valeur intermédiaire on obtient les caractéristiques à vide d'ordonnée décroissante au fur et à mesure que n croît.

On a tracé ainsi, sur la figure 3, les diverses caractéristiques à vide pour : $n = 1$, $n = 2$, $n = 4$, $n = 10$, $n = \infty$ d'une génératrice à 4 pôles, en prenant pour abcisses les courants totaux d'excitation.

La résistance du circuit inducteur varie en même temps que la valeur du shunt et est égale à $r \times \left(1 + \frac{i}{n}\right)$, r étant la résistance du circuit

Digitized by Google

inducteur pour l'une des paires de pôles. Seulement, le lieu des points de rencontre de chacune des caractéristiques à vide avec la droite correspondante représentative du circuit inducteur, qui a été tracé sur la figure 3, représente la variation de tension aux bornes de la génératrice en fonction du courant inducteur.

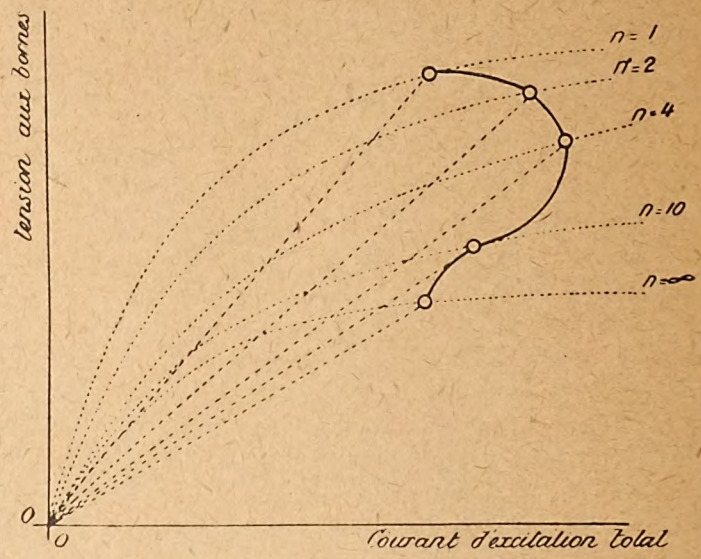


Fig. 3. — Caractéristique à vide d'une génératrice à 4 pôles avec réglage à saturation constante.

Ce cas particulier, outre qu'il présenterait des difficultés graves de réalisation, n'offre pas d'intérêt, la variation de tension dans le rapport de 1 à 2 qu'il permet de réaliser étant tout à fait insuffisante ; mais il permet de se rendre compte de la possibilité d'obtenir ,avec une machine de 10 pôles, des variations de tension dans le rapport de 1 à 5 avec une *stabilité parfaite*.

2° Avec ce dernier dispositif, le second défaut signalé par M. Fallou disparaît également, la machine fonctionnant constamment en zone saturée de sa caractéristique, la dépendance mutuelle de la tension et du courant d'excitation est très affaiblie, de sorte que, si l'on réduit la constance de temps propre des inducteurs en consentant une dépense d'énergie supplémentaire, la paresse de la machine sera très atténuée.

3° Les réactions de l'alternateur, en cas de variation brusque et passagère de charge, n'atteindront pas l'inducteur, car si la tension à l'induit de l'excitatrice vient à varier, le rhéostat de shuntage de l'inducteur absorbera cette variation passagère et évitera qu'elle se fasse sentir sur le courant inducteur, du moins pour les circuits désaimantés, qui seraient les plus sensibles.

Digitized by Google

4° Il ne reste donc, des critiques faites par M. FALLOU à l'emploi des excitatrices shunt, que la nécessité qu'il envisage d'inverser l'excitation de l'alternateur pour en obtenir un fonctionnement en réactance, mais cette critique semble la moins grave de toutes celles qu'il a faites, car elle correspond à l'utilisation dans des conditions tout à fait exceptionnelles et parfois même impossibles des machines synchrones, dont la stabilité propre dans de telles conditions de fonctionnement devient extrêmement précaire.

Conclusion. — Il semble donc que la génératrice shunt, avec réglage de la tension à « saturation constante », réponde parfaitement avec le minimum de complications aux exigences particulières des excitatrices, des alternateurs et en général des machines synchrones à forte réaction d'induit.

M. DARRIEUS, au sujet des critiques formulées par M. FALLOU à l'égard des excitatrices série, indique qu'il est nécessaire d'opter pour l'un des deux principes qui consistent, le premier à atténuer les à-coups en désexcitant les alternateurs au moment des courts-circuits, le second à maintenir coûte que coûte le couple synchronisant. L'excitation série permet de satisfaire au second principe, et de ce point de vue (rapidité de renforcement du flux), est au moins équivalente à l'excitation séparée, puisque l'enroulement auxiliaire à excitation indépendante (qu'il est d'ailleurs loisible de prévoir largement), n'intervenant qu'en période transitoire, et pour un simple rôle d'appoint, peut être fortement surchargé momentanément, ainsi que sa source.

M. DARRIEUS critique ensuite l'observation de M. FALLOU relative à l'action des amortisseurs, et montre que l'équation du circuit inducteur étant en tout cas :

$$E = RI + \frac{d\Phi}{dt}$$

quelles que soient les réactions des circuits voisins (amortisseur,... etc., courants de Foucault), le flux inducteur total Φ demeure invariable si l'excitatrice série assure :

$$E = RI \text{ avec } k = R.$$

IV. — DÉTERMINATION GRAPHIQUE DES HARMONIQUES DES FONCTIONS PÉRIODIQUES, par M. MATHIEU.

A. — *Principe de la méthode.*

Le théorème de Fourier démontre que toute fonction périodique peut se mettre sous la forme d'une somme de fonctions sinusoïdales et cela d'une seule manière :

$$y = C_0 + C_1 \sin(x - \varphi_1) + C_2 \sin(2x - \varphi_2) + \ldots + C_n \sin(nx - \varphi_n)$$

Digitized by Google

C_0 est une constante qui peut être nulle

$C_1 \sin(x - \varphi_1)$ est le terme fondamental en premier harmonique

$C_n \sin(nx - \varphi_n)$ est le $n^{\text{ième}}$ harmonique.

La suite précédente peut encore s'écrire :

$$y = C_0 + A_1 \sin x + A_2 \sin 2x \ldots + A_n \sin nx + \ldots$$
$$+ B_1 \cos x + B_2 \cos 2x + \ldots + B_n \cos nx + \ldots$$

C_0 est la valeur moyenne de la fonction y :

$$C_0 = \frac{1}{T}\int_0^T y\, dx$$

(T étant la période).

Les coefficients A_n et B_n ont pour valeur :

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T y \sin nx\, dx$$

$$B_n = \frac{2}{T}\int_0^T y \cos nx\, dx$$

Ces deux égalités signifient que :

A_n est égal au double de la valeur moyenne de la fonction

$$y \sin nx$$

et B_n est égal au double de la valeur moyenne de la fonction

$$y \cos nx$$

La décomposition d'une fonction périodique y en série de Fourier revient au calcul des coefficients A_n et B_n.

Pour résoudre ce problème lorsque la fonction y est seulement connue par sa courbe, plusieurs méthodes ou appareils ont été proposés (méthode de Sylvanus Thompson, appareil de Coradi).

Le procédé que nous proposons réalise graphiquement les courbes $y \sin nx$ et $y \cos nx$ par simples projections.

Pour cela, on passe par l'intermédiaire d'un diagramme polaire que l'on place dans l'angle supérieur gauche de la feuille (voir figure 1).

Le rayon vecteur origine est le rayon horizontal dirigé vers la droite.

Pour rechercher la $n^{\text{ième}}$ harmonique, on procède de la manière suivante :

Soit M un point de la courbe périodique donnée, ses coordonnées sont :

$$x = \alpha, \qquad y = \overline{\alpha M}$$

(α est en degrés si on divise la période en 360°).

La représentation du point M sur le diagramme polaire sera sur le

Digitized by Google

rayon vecteur d'angle : $n\alpha$ ou sur son prolongement. Si $y = \overline{\alpha M}$ est positif (cas de la figure) la représentation de M sera en m sur le rayon vecteur OS et on aura :

$$\overline{Om} = \overline{\alpha M}$$

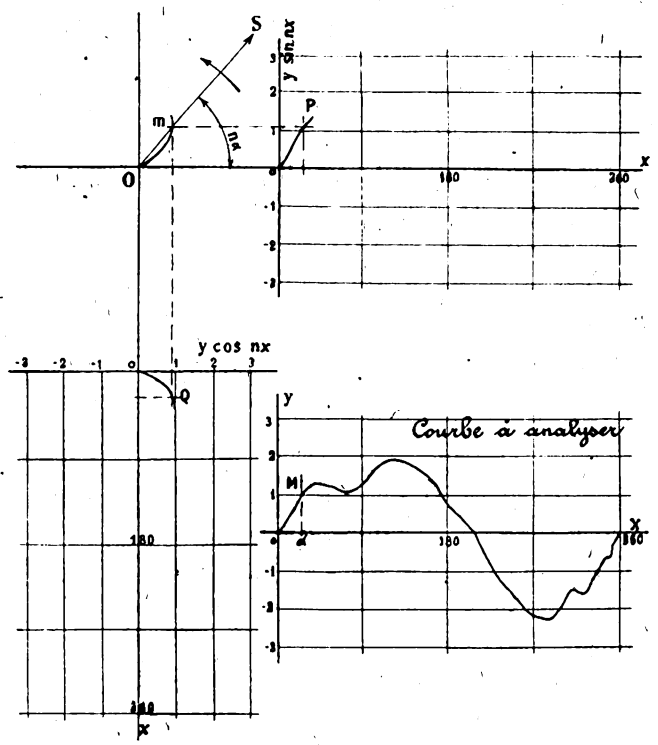


Fig. 1. — Principes de la méthode.

Si l'ordonnée de M avait été négative, la représentation de ce point aurait été sur le prolongement du rayon OS, de l'autre côté du point O.

La courbe polaire se construit donc facilement par points.

Pour obtenir la courbe $y \sin nx$, il suffira de projeter les points tels que m sur des verticales d'abscisses convenables.

Au point M correspondra donc m sur la courbe polaire et P sur la courbe $y \sin nx$; M et P ayant la même valeur α pour abscisse.

On a effet :

$$\overline{\alpha P} = \overline{Om} \sin n\alpha = y \sin n\alpha$$

De même la courbe : $y \cos nx$ s'obtiendra par la projection sur des horizontales de la courbe polaire.

Digitized by Google

A m correspondra Q d'abscisse α

$$\overline{\alpha Q} = \overline{Om} \cos n\alpha = y_\alpha \cos n\alpha$$

Les courbes $y \sin nx$ et $y \cos nx$ sont donc faciles à tracer. La valeur de leurs ordonnées moyennes

$$a_n \text{ et } b_n$$

(mesurées directement ou à l'aide d'un planimètre) représentent les demi-valeurs de A_n et B_n.

On a donc :

$$A_n = 2a_n$$
$$B_n = 2b_n$$

ce qui détermine l'harmonique n d'une façon complètement indépendante des autres harmoniques.

B. — *Applications de la méthode.*

Le procédé que nous venons d'exposer peut s'appliquer à des courbes périodiques tout à fait quelconques.

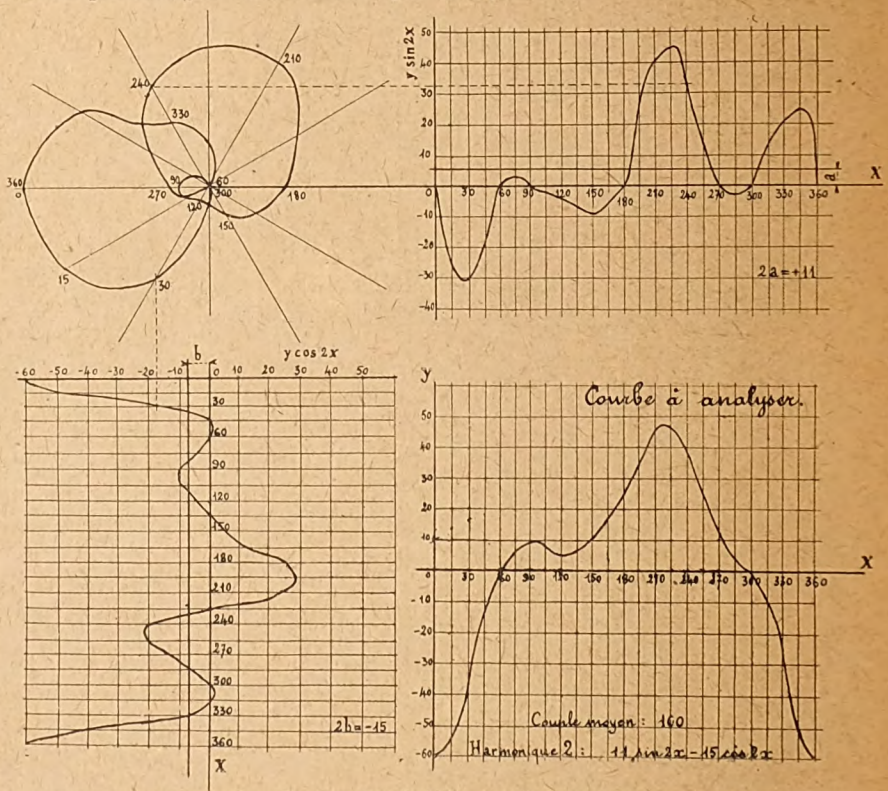


Fig. 2. — Exemple : Recherche de l'harmonique 2 du couple moteur d'un moteur à essence (6 cyl.).

Un avantage, qui peut être intéressant, est qu'il ne nécessite pas la

Digitized by Google

connaissance des autres harmoniques ni même de la position de la ligne moyenne.

La figure 2 montre la recherche du deuxième harmonique d'une ondulation du couple moteur d'un moteur à essence à 6 cylindres en ligne.

Sur cette figure on remarquera que les points de la courbe polaire sont numérotés à l'aide du même nombre que l'abscisse des points qu'ils représentent; cette manière d'opérer permet un tracé plus rapide des courbes $y \sin nx$ et $y \cos nx$ à cause de cette concordance.

C. — *Remarque pour la détermination des harmoniques d'ordre n élevé.*

On peut diminuer les chances d'erreur et permettre un tracé plus rapide en augmentant la clarté du diagramme polaire par la réduction du nombre des rayons vecteurs utilisés.

En effet, si on divise la période en 360 degrés on est obligé d'utiliser les 360 rayons vecteurs pour tracer la courbe polaire relative à l'harmonique 17 par exemple.

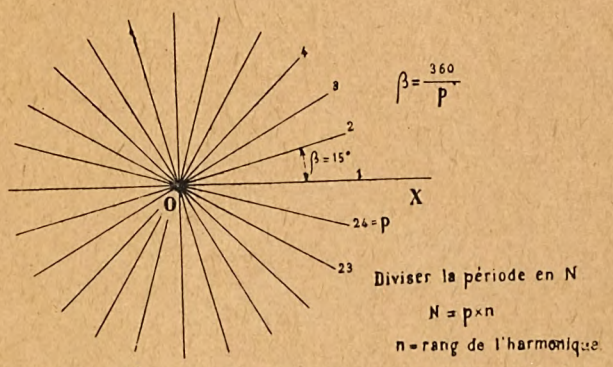


Fig. 3. — Réduction du nombre des rayons vecteurs utilisés.

On peut s'imposer de se servir de 24 rayons vecteurs seulement (voir figure 3); il suffit de diviser la période en $24 \times 17 = 408$ divisions égales.

Remarquons que, dans ce cas, la précision sera plus grande puisque les rayons utilisés successivement sont séparés de 15°, tandis que la division de la période en 360° donnait : 17°.

D'une façon générale, si l'on veut utiliser p rayons vecteurs pour la détermination de l'harmonique n il faut diviser la période entière en N divisions égales :

$$N = p \times n.$$

Digitized by Google

Telle est la méthode graphique de détermination des harmoniques que nous avons employée et qui peut donner des résultats aussi précis que les méthodes de calculs en dépensant moins de temps et en laissant un travail matériel facilement vérifiable.

M. Boucherot. — Je suis bien d'accord avec M. Mathieu sur la première partie de cette note : mon article de 1893 ne comporte pas cette particularité de l'obtention graphique par projection d'une courbe polaire intermédiaire; ceci lui est bien propre.

Je le suis moins sur la seconde partie : l'appareil que j'ai décrit et réalisé à cette époque fait toujours les intégrales de $y \sin n\,dx$ et $y \cos nxdx$; il ne trace pas les courbes, dont le tracé n'a en réalité aucun intérêt, mais il permet de les intégrer par un artifice, etc..., ce qui suffit.

M. Mathieu. — Je remercie M. Boucherot de son intervention. Je pense que la simplicité de l'appareil construit par M. Boucherot, il y a trente cinq ans, et décrit dans l'article cité dans sa note, devrait intéresser les constructeurs d'instruments de mesure.

La technique électrique et la technique mécanique ont également besoin de résoudre les problèmes d'analyse harmonique, mais les appareils spéciaux sont encore trop rares et quelquefois très délicats.

La méthode graphique que nous avons exposée permet de se dispenser d'appareil et nous pensons qu'elle peut rendre service aux personnes habituées au dessin.

M. Darrieus indique une méthode graphique basée sur la transformation de l'intégrale :

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T y \cos n\omega t\, dt$$

en l'intégrale

$$A_n = \frac{1}{n\pi}\oint y\, d(\sin n\omega t)$$

Elle revient à enrouler la courbe à analyser sur un cylindre, puis à la projeter sur un plan diamétral. L'intégration peut alors se faire au moyen d'un planimètre ordinaire, qui donne $n\pi A_n$.

M. Darrieus montre que cette méthode s'applique particulièrement à l'étude des diagrammes d'indicateurs des machines thermiques pour analyser les efforts moteurs en fonction du temps. Pour déterminer l'harmonique de rang n, il suffit de déplacer la courbe en la transformant : un point d'ordonnée y dont l'abscisse est $x = \sin \omega t$ sur la courbe originale est porté au point de coordonnées y et

Digitized by Google

$x = \sin \omega t$ pour le coefficient A_n en $\cos n\omega t$, et en $x = -\cos n\omega t$

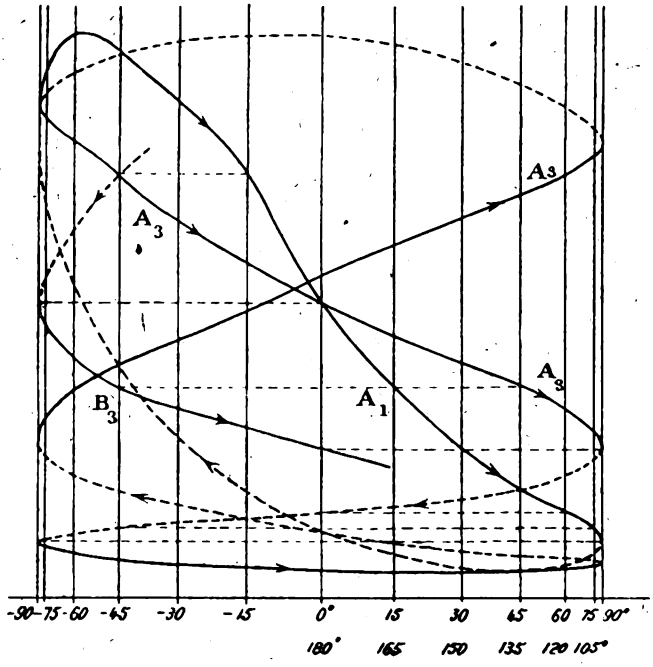


Fig. 1. — Exemple d'analyse harmonique d'une courbe d'indicateur.

pour le coefficient B_n en $\sin \omega t$.

Ces constructions graphiques, très simples, peuvent être effectuées sur la même feuille pour tous les harmoniques.

2e SECTION. — ÉCLAIRAGE, CHAUFFAGE.

Président : M. Maurice Leblanc

Séance du 22 novembre 1927. — I. *Compte rendu du Congrès International de Bellagio. — Programme du Travail de la deuxième section par M. Maurice Leblanc.* — M. le Président rend compte sommairement des travaux du Congrès International tenu à Bellagio au commencement de septembre, et destiné à préparer le Congrès International qui aura lieu aux Etats-Unis en 1928. Il rappelle le rapport de M. Marks sur l'éclairage des usines et des écoles et demande s'il serait possible de répéter en France les expériences d'éblouissement dont il est question dans ce

Digitized by Google

rapport. M. DE VALBREUZE se met à la disposition de la 2e section pour exécuter ces expériences à la Société pour le perfectionnement de l'éclairage.

M. le Président explique que, en vertu d'une décision du Congrès de Bellagio, chaque nation est désormais chargée de centraliser les études relatives à une question déterminée, les autres nations devant désigner une personne qualifiée pour se mettre en rapport avec le Comité de la Nation choisie pour toute communication intéressant cette question.

La liste des Comités est la suivante.

1° *Comité du vocabulaire. — Suisse. — Délégué français, M. Fleury.*

Il prépare un vocabulaire électrotechnique en différentes langues.

2° *Comité des définitions et symboles. — France.*
Président, M. Blondel.

Ce Comité s'efforce de faire adopter un système universel de nomenclature.

3° *Comité de l'Eclairage des Usines et des Ecoles. — Etats-Unis.*
Délégué français, M. Leblanc.

Ce Comité doit déterminer les valeurs d'éclairement suffisantes pour les diverses industries et aussi étudier toutes les conditions influant sur le rendement.

La coopération des architectes, des ophtalmologistes, des physiologistes et des ingénieurs éclairagistes, est donc essentielle et l'importance de la question est évidente.

Les travaux de la commission seront d'un grand secours.

4° *Comité des Projecteurs d'Automobile. — Etats-Unis.*
Délégué français, M. Bossu.

Ce Comité étudie les projecteurs d'automobile, en vue d'obtenir une meilleure définition de la valeur d'un projecteur. L'échange d'opinions entre experts et le travail expérimental constituant la meilleure méthode pour déterminer les moyens les plus efficaces de supprimer l'éblouissement.

5° *Comité de la Photométrie hétérochrome. — France.*
Président, M. Fabry.

Sous la direction de ce Comité, des recherches ont été entreprises

Digitized by Google

en vue de déterminer une méthode convenable, de photométrie hétérochrome.

Les cinq sujets précédents ont déjà retenu l'attention des divers Comités techniques créés à Paris (1921) et Genève (1924). Les suivants correspondent à de nouveaux champs d'activité.

6° *Comité de l'Eclairage des rues. — Allemagne.*
Délégués français, MM. Imbs et Laurain.

Le développement de la circulation dans les rues et son contrôle nécessitent la reprise des problèmes de l'éclairage. Le nombre toujours croissant des accidents atteint des proportions alarmantes et des conseils sont demandés pour aider les autorités responsables dans leur mission de réduire les risques d'accident à un minimum.

Ce Comité étudiera les conditions essentielles et les exigences d'un éclairage satisfaisant des rues.

Il préparera aussi les spécifications pratiques.

7° *Comité des Verres pour la Signalisation. — Angleterre.*
Délégués français MM. Leblanc et Lebaupin.

Ce Comité s'efforcera d'établir des étalons et des définitions pour les verres de signaux, en vue d'assurer :

a) une entente internationale sur les méthodes utilisées pour les définitions et les essais;

b) la préparation de verres de différentes couleurs.

8° *Comité du Matériel Diffusant. — Allemagne.*
Délégué français M. de Valbreuze.

La grande variation des qualités diffusantes et réfléchissantes des appareils commerciaux a toujours été dans le passé une source de difficultés.

Ce Comité espère établir des méthodes conduisant à définir :

a) des « essais de types »;

b) des « essais de réception » des appareils.

9° *Comité des Plaques-Etalons Photométriques. — Autriche.*
Délégué français, M. Baillaud.

La méthode actuelle de mesure des éclairements intérieurs ou extérieurs est loin d'être standardisée, et on trouverait des avantages

Digitized by Google

considérables à adopter des méthodes permettant de comparer les rapports faits dans les différents pays.

Ce Comité s'efforcera :

a) d'obtenir une entente sur la hauteur du plan où sont faites les mesures d'éclairement;

b) d'établir une spécification des plaques-étalons utilisées.

10° *Comité sur la Précision Photométrique. — Hollande.*
Délégué français, M. Jouaust.

Ce Comité examinera la précision des mesures photométriques en vue de préparer un règlement qui puisse être adopté internationalement, d'indiquer la précision que l'on peut espérer dans les essais photométriques de divers ordres. Ce Comité doit aussi indiquer les services que l'on peut attendre des photomètres de diverses classes.

11° *Comité de Distribution du Flux Lumineux. — Belgique.*
Délégués français, MM. Leblanc, Bossu.

On rencontre souvent des difficultés à comparer des luminaires provenant de différents fabricants, car il n'existe pas de méthode générale permettant de définir leurs caractéristiques.

Ce Comité examinera la possibilité de définir la distribution de la lumière par une série de mesures faites dans des zones étalons. On espère ainsi faciliter la comparaison entre les divers catalogues et rendre les opérations d'achat et de vente de ce matériel plus équitables.

12° *Comité de l'Eclairage par la Lumière du Jour. — Angleterre.*
Délégués français, MM. Jouaust, Baillaud.

La connaissance de la pénétration de la lumière du jour par les fenêtres est de grande importance dans la construction des bâtiments.

Ce Comité étudiera des méthodes de mesure de l'éclairement diurne dans l'espoir de trouver un critérium universel de son efficacité.

L'effet des bâtiments voisins ou des autres obstacles réduisant l'éclairage diurne sera pris en considération.

13° *Comité de l'Eclairage des cinémas. — Japon.*
Délégué français, M. Leblanc.

Ce Comité s'efforcera de déterminer les conditions à remplir pour assurer une brillance suffisante à l'écran avec un minimum d'éblouissement et de distorsion.

Digitized by Google

14° *Comité des Recherches Fondamentales sur l'Eblouissement. Italie. — Délégués français, MM. Leblanc, Bossu.*

Tandis que les regrettables effets de l'éblouissement sont reconnus par les éclairagistes, les méthodes utilisées pour les réduire reposent sur des bases plus ou moins empiriques. Des travaux récents ont montré que l'éblouissement pouvait faire l'objet de mesures quantitatives. Ce Comité continuera le travail commencé et on espère arriver à une meilleure compréhension des phénomènes d'éblouissement.

15° *Comité de colorimétrie. — Angleterre. Délégué français, M. Jouaust.*

Les problèmes de colorimétrie sont liés intimement à ceux de la photométrie, ils ont une grande importance pour les éclairagistes, particulièrement dans les questions relatives aux verres pour signaux et aux verres colorés de toutes espèces.

Des progrès considérables en colorimétrie ont été faits en ces dernières années dans plusieurs pays, et le moment semble venu de considérer cette question au point de vue international.

II. — *Communication d'un travail officiel anglais sur l'éclairage des ateliers de composition d'imprimerie, par M. Wetzel.* — M. Wetzel insiste sur le caractère officiel de ce travail, qui a été en-Committee et l'Industrial Fatigue Research Board et qui a été surveillé par des délégués du Joint Industriel Council for the printing and allied trades. Ces recherches, faites par un Comité d'éclairagistes conjointement avec un Comité de médecins, sous la surveillance d'industriels intéressés, présentaient donc le maximum de garanties. Le système d'éclairage employé comportait des réflecteurs industriels en tôle émaillée de forme rationnelle avec des lampes demi-émaillées, qui étaient placées de façon à assurer un éclairement uniforme en évitant l'éblouissement. Les rendements ont été mesurés en comptant le nombre de lettres placées dans les casses pendant chaque demi-heure de travail. Le nombre des erreurs et des lettres retournées a été aussi calculé. Les éclairements ont varié de 13 à 240 lux. Un essai a également été fait à la lumière naturelle sous un éclairement variant de 200 à 5 000 lux. Les résultats ont montré que l'on pouvait obtenir un gain de rendement de 25 pour cent environ, en passant de l'éclairement minimum à 240 lux ou à la lumière naturelle et un gain de plus de 20 pour cent en passant de

Digitized by Google

70 lux à la même valeur. L'optimum serait d'environ 200 lux. Les erreurs et les lettres retournées augmentent de 130 pour cent quand on passe de 240 à 13 lux. L'amélioration de rendement est très faible au delà de 100 lux, mais les auteurs estiment qu'au point de vue économique, il est encore avantageux de dépasser cette valeur.

Les conclusions de ce rapport sont analogues à celles du travail que M. BARGERON a fait en novembre 1923, sauf en ce qui concerne la valeur de l'optimum d'éclairement qui serait de 20 à 25 lux d'après M. BARGERON.

M. WETZEL pense que cet écart considérable provient des différences existant entre les systèmes d'éclairage employés, les réflecteurs des ateliers où ont été effectuées les expériences de M. BARGERON étaient d'un type démodé et placés trop directement au-dessus des casses. Les expériences anglaises, d'abord faites avec des réflecteurs de ce genre, ont été abandonnées à cause de l'incertitude des résultats obtenus. Il est donc indispensable de comparer, dans de telles expériences, non seulement la « quantité », mais aussi la « qualité » de la lumière fournie.

Digitized by Google

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ (1)

TRACTION. — CANALISATIONS. — DISTRIBUTION GÉNÉRALE.

Interrupteurs et Disjoncteurs dans l'huile, par Pierre PAGNON, Ingénieur-Chef des Etudes aux Etablissements Merlin et Gérin, et L. BARBILLION, Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Polytechnique — Paris, Albin Michel, [1927]; un vol. broché 25cm × 16cm, de 304 pages, avec 220 figures. (« *Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien Mécanicien* »). [Prix : 30 francs] (Don de l'éditeur).

Modes spéciaux de traction électrique par courant continu. Tendances modernes. Traction par accumulateurs. Electrobus. Traction thermo-électrique, par L. BARBILLION, Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Polytechnique. — Paris, Albin Michel, [1927]; un vol broché 25cm × 16cm, de 127 pages, avec 63 figures. (« *Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien-Mécanicien* »). [Prix : 10 francs]. (Don de l'éditeur).

TÉLÉPHONIE.

Les Installations téléphoniques automatiques, par le Dr. Ing. F. LUBBERGER, Traduit de l'allemand par E. MUNCH, Ingénieur. — Préface de E. REYNAUD-BONIN, Ingénieur des Postes et Télégraphes, Directeur des services téléphoniques de Paris. — Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1927; un vol. relié toile 25cm × 16cm, de XXII-311 pages, avec 160 figures hors texte. (Don de M. Munch, traducteur).

Ondes hertziennes. — Par H. BOUASSE, Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse. (« Bibliothèque scientifique de l'Ingénieur et du Physicien »). — Paris, Librairie Delagrave, 1925; un vol. broché 25cm × 16cm, de XXV, 347 pages avec 184 figures. [Prix : 42 francs]. (Don de l'éditeur).

GÉNÉRALITÉS. — ETUDES THÉORIQUES. — RECHERCHES PHYSIQUES.

Influence de l'écrouissage et du recuit sur les propriétés magnétiques de minces fils d'invar, de fer et d'acier, par Mme C. BIÉLER-BUTTICAZ. (Extrait des *Archives des sciences physiques et naturelles* Tome 9, janvier-février 1927).— Genève, Imp. Albert Kundig, 1927; une brochure 25cm × 16cm, de 20 pages, avec 2 fig. et une planche hors texte. (Don de l'Université de Genève, Laboratoire de Physique).

---

(1) Ces ouvrages peuvent être consultés à la Bibliothèque de la Société française des Electriciens, 14, rue de Staël, de 14 à 17 heures, tous les jours sauf le Dimanche.

Digitized by Google

Quelques idées sur l'Electrodynamique, par R. Ferrier, Ingénieur des Ponts et Chaussées Préface de Paul Painlevé, Membre de l'Institut. — Paris, Librairie scientifique Albert Blanchard, 1927 ; un vol. broché $22^{cm} \times 13^{cm}$ 5 de 48 pages. [Prix : 5 francs]. (Don de l'éditeur).

Méthodes et instruments de mesure. Compteurs. — Essais de machines.

The National Physical Laboratory. Report for the Year 1926. — London, 1927 published by his Majesty's Stationery Office for the Department of Scientific and Industrial Research ; un vol. broché $27^{cm} \times 20^{cm}$, de 260 pages, avec 69 figures, dont 9 hors texte. [Prix : 7 sh. 6 pences]. (Don du National Physical Laboratory).

Congrès. — Expositions. — Sociétés. — Syndicats. — Annuaires Actes officiels. — Études économiques, etc...

Pour éviter l'électrocution (haute et basse tension), par Maurice Roussel, Ingénieur à la Compagnie parisienne de Distribution d'Electricité. — Paris, Dunod, 1927 ; un vol. broché $19^{cm} \times 12^{cm}$, de IX-82 pages. [Prix : 6 francs]. (Don de l'éditeur).

Les hauts salaires, par F. Bayle. *La théorie du salaire moderne. Origine et justification du profit. La politique économique et les parasites sociaux. La journée de huit heures.* — Paris, Librairie Félix Alcan, 1927 ; un vol. broché $20^{cm} \times 13^{cm}$, de 624 pages. [Prix : 30 francs]. (Don de l'auteur).

Table générale des Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences, publiée par MM les Secrétaires perpétuels. — *Première partie : Auteurs.* Tome 122 à 151. — 6 janvier 1896 au 27 décembre 1910. — Paris, Gauthier-Villars et fils, 1927 ; un vol. broché $28^{cm} \times 22^{cm}$, de 590 pages. (Don de l'Académie des Sciences).

Maschinenfabrik, Œrlikon *1876-1926.* — Gedruckt in der Buchdruckerei Berichthaus, Zürich, 1926 ; un vol. relié $29^{cm} \times 23^{cm}$, de 192 pages avec figures dans le texte et planches hors texte. (Don de la Société Œrlikon).

Applications diverses de l'électricité, Médecine, etc.

Spurenkunde der Elektrizitat. Elektrophysiographie, Von Prof. Dr Méd Stefan Jellinek Honorardozent an der Technischen Hochschule in Wien — Leipzig und Wien, Frantz Deuticke, 1927 ; un vol. broché $26^{cm} \times 17^{cm}$, de 101 pages, avec 152 fig. dans le texte et 1 planche en couleurs hors texte. (Don de l'éditeur).

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Publication subventionnée par la Confédération des Sociétés scientifiques françaises à l'aide des fonds alloués par le Parlement.

Production et utilisation mécanique de l'électricité

Accumulateurs électriques, par A. Castex, Professeur à l'Institut Polytechnique de l'Université de Grenoble ; préface de Louis Barbillion, Directeur de l'Institut Polytechnique. Bibliothèque de l'Ingénieur électricien-mécanicien. — 1 vol. broché 25cm × 16cm de 296 pages, 222 figures. Paris, Albin Michel ; don de l'éditeur. — Prix 30 francs.

Ce traité étudie dans une première partie les accumulateurs et dans la deuxième leurs applications.

1re Partie. — Chapitre 1er : principe de l'accumulateur, ses caractéristiques.

Chapitre 2e : théories chimiques communément admises pour l'accumulateur au plomb ; double sulfatation.

Chapitre 3e : propriétés de l'accumulateur au plomb : capacité, rendement.

Chapitre 4e : principaux types de plaques ; parties diverses des éléments.

Chapitre 5e : principales marques françaises.

2e Partie. — Chapitre 6: : emploi des accumulateurs comme réserve d'énergie dans les stations centrales ; exemples d'installations.

Chapitre 7e : batteries tampons ; leur accouplement avec les dynamos.

Chapitre 8e : fonctionnement des batteries tampons avec les survolteurs-dévolteurs automatiques dont il est décrit quelques types.

Chapitre 9e : montage des survolteurs automatiques ; précautions à prendre.

Chapitre 10e : exemple de calcul d'une batterie.

Chapitre 11e : installation des batteries pour postes fixes.

Chapitre 12e : soins à donner aux batteries ; accidents divers, sulfatation, déformation, etc.

Chapitre 13e : batteries transportables pour traction et sous-marins, pour démarrage, pour éclairage des automobiles et des trains ; batteries de T. S. F. ; choix des éléments et précautions à prendre pour chaque application.

Chapitre 14e : méthodes d'essai des batteries.

Chapitre 15e : accumulateurs au fer-nickel et leurs propriétés.

La Mesure des débits et l'aménagement des Usines Hydrauliques, par E. Montagne, Paris. Albin Michel, 1927, un vol broché 25cm × 16cm de II, 201 pages avec 118 figures (Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien Mécanicien. — Prix 20 francs. (Don de l'éditeur), par E. Montagne Ingénieur Ancien Elève de l'Institut Electrotechnique de Grenoble avec la collaboration et une préface de L. Barbillion, Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Electrotechnique — Bibliothèque de l'Ingénieur Electricien-Mécanicien, Editeur, Albin Michel, 22, rue Huyghens, Paris. (Don de l'éditeur).

Les auteurs débutent par une étude très intéressante relative à l'évaluation des régimes des cours d'eau et de leur bassin non encore aménagés, étude basée sur des résultats statistiques très complets.

Au chapitre suivant sont examinées les méthodes de mesures de débits à employer selon la nature et le régime du cours d'eau à étudier. On peut à cet

Digitized by Google

effet utiliser, soit les mesures directes par réservoirs ou compteurs d'eau, soit des mesures indirectes consistant à déterminer la vitesse moyenne de l'eau. Celles-ci sont exposées en détail et comprennent les jaugeages par déversoirs, vannes, tuyères, moulinets, méthode chimique, etc...

Les jaugeages sur canaux découverts, l'influence de la nature des parois sur la vitesse moyenne de l'eau, la mesure directe de cette dernière à l'aide du rideau d'Anderson, sont étudiés spécialement. Malgré les nombreux facteurs et difficultés intervenant dans les mesures hydrauliques, on arrive à des résultats très près de la réalité comme le prouve un tableau de résultats comparatifs entre les méhodes suivantes employées pour la mesure du débit d'un même canal :

Rideau d'Anderson	1299 l/sec
Moulinet	1291 l/sec
Méthode chimique	1307 l/sec
Déversoir	1302 l/sec

ces chiffres méritent d'être mentionnés ici.

Les auteurs consacrent le dernier chapitre à l'étude très détaillée des méthodes et appareils de mesure courants. L'emploi du compteur Venturi pour la mesure des pressions, des flotteurs et moulinets, du tube de Pitot pour la mesure des vitesses, le principe, l'étalonnage et les perfectionnements de ces appareils sont examinés particulièrement.

Cet intéressant ouvrage, très bien documenté et contenant des études personnelles, sera consulté avec profit par les ingénieurs non spécialisés auxquels il fournira des renseignements précieux pour les mesures de débits qu'ils peuvent avoir à effectuer.

Canalisation. — Distribution générale. — Traction

Interrupteurs et disjoncteurs dans l'huile, par Pierre Pagnon, Ingénieur I.E.G., Ingénieur Chef des études aux Etablissements Merlin et Gérin et Louis Barbillion, Professeur à l'Université de Grenoble, Directeur de l'Institut Polytechnique de Grenoble, Bibliothèque de l'Ingénieur électricien-mécanicien. — 1 vol. broché de 25cm × 16cm de 304 pages, 220 figures. Paris, Albin Michel ; don de l'éditeur. — Prix 30 francs.

Cet ouvrage comprend trois parties : 1° conception moderne des appareils ; 2° leur construction ; 3° postes de disjonction type extérieur ; signalisation.

La 1re partie traite : du gros appareillage dans l'huile pour tensions haute et moyenne en donnant des exemples pris parmi les types des principaux constructeurs ; de la réalisation et du réglage des appareils automatiques à maximum, à minimum, à tension nulle, à retour du courant ; de la puissance et de l'énergie mises en jeu dans les arcs de rupture, en particulier dans l'arc à courant alternatif dans l'huile (effets chimiques, dégagements gazeux, élévation de température et de pression).

La 2e partie expose les questions suivantes : dimensions minima à donner à un disjoncteur pour une tension nominale et un courant de court-circuit donnés ; isolation et essais ; forces électromagnétiques développées dans les disjoncteurs puissants ; valeurs du courant d'établissement et du courant permanent de court-circuit ; calcul complet de l'isolation radiale et longitudinale des conducteurs de sortie, répartition du gradient de potentiel dans l'isolant, causes des ruptures diélectriques ; bornes condensateurs ; types de contacts ; mécanismes de commande ; bacs à huile, dimensions à leur donner eu égard aux pressions développées ; dimensions des orifices d'évacuation ; phénomènes explosifs dans les disjoncteurs à huile ; qualités à imposer aux huiles.

La 3e partie indique l'extension actuelle des postes extérieurs, même en moyenne tension ; leurs avantages ; on y trouve la description des principaux postes français de ce type (Lannemezan, Laneuveville, Chevilly, Bully, Abbeville, etc.) ; l'indication des précautions à prendre, des dispositifs de protection, des renseignements sur l'entretien du poste, la signalisation, les modes divers d'intercommunication, téléphonie et radiotéléphonie.

Digitized by Google

IL Y A 30 ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 1er Décembre 1897.

Présidence de M. H. Pellat, Vice-Président.

M. le Professeur Riccardo Arno, venu tout exprès de Turin, expose la théorie analytique de sa méthode de démarrage des moteurs asynchrones à courant alternatif simple. Il déduit, de cette méthode, la valeur de la résistance critique à insérer dans les enroulements élémentaires de l'armature, pour assurer le démarrage à vide ou sous faible charge, moyennant une légère impulsion mécanique. Il rappelle que la valeur du moment du couple moteur a été indiquée, pour la première fois en 1891, par Hutin et Leblanc.

Maurice Leblanc résume en quelques mots ses travaux sur la matière et il félicite M. Riccardo Arno d'en avoir déduit la valeur de la résistance critique.

M. Désiré Korda résume les divers procédés employés ou proposés pour le démarrage des moteurs asynchrones monophasés ; notamment ceux de Kando et d'Heyland.

M. le Professeur Riccardo Arno indique une modification à sa méthode qui permet le démarrage sans impulsion mécanique et par le simple jeu d'un interrupteur, qui, au premier moment, introduit une dissymétrie dans l'armature. M. Ch.-Ed. Guillaume, expose les propriétés des aciers à 30–40 pour 100 de nickel, qu'il a fait préparer par les aciéries d'Imphy.

Digitized by Google

TABLE MÉTHODIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME VII (4e SÉRIE)

CLASSIFICATION

A. — Production et utilisation mécanique de l'électricité.
B. — Eclairage et chauffage.
C. — Chimie, électrochimie, électrométallurgie, piles, accumulateurs.
D. — Appareillage général, canalisations, traction.
E. — Télégraphie, téléphonie, transmission par ondes.
F. — Recherches physiques, physiologie.
G. — Appareils et méthodes de mesure.
H. — Météorologie.
I. — Mathématiques, Mécanique rationnelle et mécanique appliquée.
J. — Congrès, expositions, actes officiels, annuaires, études économiques, inventaires, statistiques, commémorations.
K. — Formulaires, aide-mémoires, manuels.
L. — Communications et informations diverses.

N. B. — *Le numéro en italique dans les ouvrages offerts et la bibliographie se réfère au compte rendu de l'ouvrage.*

A. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

1° Communications faites a la Société.

PAGES

Comment produire gratuitement un kWh de 3000 calories ? par M. Herry 520
Note de M. E. Mercier 545
Emploi de l'électricité dans les travaux souterrains des mines grisouteuses, par M. Audibert. 398
Observations de M. Mathivet 418
Observations de M. Neu 419
Réponse de M. Audibert 420
Echauffement des machines électriques (Etude analytique de l'), par M. Roth 840
Fonctionnement en régime amorcé d'une génératrice asynchrone isolée, par MM. Langlois et Létrillart. 973
La forme d'onde de la tension en charge dans les alternateurs, par M. Ricalens 969
Moteurs polyphasés à collecteur et leurs principales applications (état actuel de la construction des). Discussion du rapport de M. Berger : MM. Gratzmuller et Darrieus 38
Pertes dans les machines électriques. — Discussion du rapport de M. Ricalens : MM. Roth, Belfils, Le Monnier, Iliovici, Gratzmuller 51
Procédés statiques d'équilibrage d'une charge monophasée dans un réseau triphasé. Discussion du rapport de M. Genkin : MM. Iliovici, Darrieus, Genkin 89

Digitized by Google

PAGES

Transformateurs. (Une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les). Discussion du rapport de M. Fallou : MM. Bunet, de Pistoye, Girault, Kopeliovitch, Fallou, Darrieus, Dessus 70
L'Usine d'Eguzon et l'électrification du réseau d'Orléans, par M. Parodi 547
Observations de M. G. Laporte 566

2° Travaux des Sections

Liaison entre réseaux à fréquences différentes 95
Fantômes magnétiques relevés dans l'entrefer et entre les pôles d'un alternateur à pôles saillants 100
Ordre du jour de la Semaine de Discussions d'octobre 1927 234
Relevés statistiques pour déterminer la tolérance sur le facteur de puissance 234
Une image mécanique d'hystérésis 235
Le tracé des lignes de force 451
Théorie analytique de la chaleur 451
Contribution statistique à la détermination des tolérances 452
Applications du klydonographe à l'enregistrement des surtensions dans les réseaux 456
Une butée magnétique 457
Signification physique de la tension de réactance dans les machines à champ tournant 709
Méthode simplifiée de calcul des caractéristiques à vide des machines à pôles saillants 717
Fonctionnement en régime amorcé d'une génératrice asynchrone isolée du réseau 807
Détermination d'un programme d'étude des moteurs électriques de laminoirs 1450
Calcul des courants de court-circuit des réseaux en fonction du temps 1454
Mode d'excitation des alternateurs à grande puissance et à forte réaction d'induit 1456
Détermination graphique des harmoniques des fonctions périodiques . 1465

3° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

Accumulateurs électriques, par F. Castex 1399-*1479*
Alternateurs industriels, par M. L. Barbillion 724-*1400*
Chaudières et condenseurs, par F. Cordier 1399
Considérations sur l'auto-excitation des alternateurs branchés aux lignes de haute tension, par Petresco 833
Différentes conceptions et opinions concernant la notion de puissance réactive en régime non sinusoïdale, par Budeanu 833
Génératrice de courants et moteurs électriques. — Introduction à l'étude de l'électrotechnique appliquée, par M. Gutton . . . 366 *367*
Groupes électrogènes, par R. Bardin 478
Machines asynchrones à champs tournants à bagues et à collecteur, par Richard Langlois 120 *244*
Machines électriques (schémas et règles pratiques de bobinages des), par F. Torices 1399-*1400*
Polyphase Induction Motors, par R. D. Archibald *121*
Technique de la houille blanche et des réseaux et usines hydroélectriques, par E. Pacoret *121*
Transformateurs de puissance. Calculs, constructions. Applications industrielles. Bobines d'inductance, par Marcel Mathieu . . . 595-*835*
Transformation de l'énergie électrique. Tome Ier : Transformateurs, par René Carton et Dumartin 595 *835*
Usines hydrauliques (La mesure des débits et l'aménagement des), par E. Montagne 1399-*1479*
Usines hydroélectriques, par Charles L. Duval *478*

Digitized by Google

PAGES

Utilisation rationnelle des Combustibles. Distillation des combustibles à basse température, par R. Courau et Henri Besson 1399
Utilizzazioni di forze idrauliche. Impianti Idrœlettrici, par M. Francesco Marzolo 475

Il y a Trente ans

Théorie analytique d'une méthode de démarrage des moteurs asynchrones à courant alternatif : MM. Riccardo Arno, Leblanc, Korda, Guillaume 1481

B. — ECLAIRAGE ET CHAUFFAGE

1° Communications faites a la Société

Appareil d'éclairage pour aviation. — Discussion du rapport de M. Marsat : MM. le colonel Renard, Maurice Leblanc, Franck, Brandt, Benard, Dr Couvreux 174
Comparaison entre les systèmes à optique et les systèmes à miroir, par M. J. Benard 194
Considérations sur l'établissement des aérophares, par M. A. Blondel . 203
Eblouissement visuel. — Discussion du rapport de M. le Dr Couvreux : MM. Blondin, Matigot, Couvreux, M. Leblanc 171
Utilisation de la lumière dans les appareils d'éclairage public. — Discussion du rapport de M. Wetzel : MM. Maisonneuve, Desarces, Wetzel, Matigot, Brandt 166

2° Travaux des Sections

Emploi de petits projecteurs dans la prise de vue photographique et cinématographique 100
Modifications à apporter au projet de règlement d'éclairage des usines étudié par le Comité d'éclairage 103
Eclairage des studios de photographes 235
Analyse d'une lettre de M. Marks au sujet de l'éclairage des usines . . 236
Soudure à l'hydrogène atomique 236
L'uniformité de l'éclairement sur les voies publiques 461
Les nouveaux résultats obtenus dans la construction des tubes à gaz rares 717
Résultats du concours des appareils de chauffe eau par accumulation 717
Compte rendu du Congrès international de Bellagio. — Programme du travail de la 2e Section 1471
Eclairage des ateliers de composition d'imprimerie 1476

3° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

La cuisine domestique à l'électricité, par Foulcher 122

4° Il y a Trente ans

Arc électrique en vase clos, par le Docteur Marks 248
Discussion.
Chauffage et cuisine électriques, par M. Colin 248
Réglage des lampes à arc à courant alternatif, par Georges Claude . 726

C. — CHIMIE. — ELECTROCHIMIE. — ÉLECTROMÉTALLURGIE PILES. — ACCUMULATEURS

1° Communications faites a la Société

Accumulateurs Ironclad. — Discussion de la communication de M. Jumau : MM. Gasquet et Girault 224

Digitized by Google

PAGES

Accumulateurs électriques, par M. Jumau 1430
Note de M. Fery 1446
Réponse de M. Jumau 1448
Arc électrique de soudure, par M. Brillie 1065
Fabrication du carbure de calcium et de la cyanamide. — Discussion du rapport de M. Curmer : MM. Bunet et Darrieus 215
Fours d'électrochimie. — Discussion du rapport de MM. Bergeon et Bunet : MM. Genkin et Darrieus 213
Installations électrolytiques d'hydrogène en vue d'utiliser au maximum la puissance d'une centrale électrique. — Discussion du rapport de M. Sarrot du Bellay : M. Bunet 229
Soudure électrique (La), par M. Languepin 1031
Systèmes de réglage des fours électriques à résistance et à arcs, par M. Marcel Mathieu 1007
Théorie des accumulateurs au plomb. — Discussion du rapport de M. Féry : MM. Jumau et Bichet 228
Utilisation des fours électriques dans la fonderie des alliages et des métaux non ferreux. — Discussion du rapport de M. Levasseur : MM. Maries, Vuigner, Gutmann, Cordier, Ets Marshall 218

2° Travaux des Sections

Système de réglage des fours électriques à résistance et à électrodes 104
La soudure électrique 236
Réduction électrolytique de l'indigo bleu en indigo blanc 464
Le facteur de puissance des fours à induction 465 807
Programme des journées de discussion d'octobre 469
Le glucinium 571
Les redresseurs électrolytiques 574
Le raffinage de l'aluminium 575

3° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

Principes de l'électrochimie, par J. Ponsinet 595 *836*

4° Il y a Trente ans

L'accumulateur Tudor à charge rapide, par M. Blanchon 370

D. — APPAREILLAGE GENERAL. — CANALISATION TRACTION

1° Communications faites a la Société

Avantages comparés de l'électrification appliquée aux voies ferrées ou aux véhicules automobiles sur routes au point de vue de l'économie nationale (Les). — Discussion du rapport de M. de Coninck : MM. Fourcault, Gratzmuller, de Coninck 311
Block automatique Beaumont-Creil (Note sur le), par M. Debionne . 1391
Calcul du courant de court-circuit dans les réseaux triphasés. — Discussion du rapport de M. Fallou : MM. Genkin, Iliovici, Kopeliovitch, Gratzmuller 296
Comparaison entre le courant continu et le courant alternatif, par M. Mathivet 1237
Condensateurs électriques, par M. de Bellescize 473
Définition du pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile. — Discussion du rapport de M. Charpentier : MM. Saint-Germain, Kloninger, Charpentier, Fallou, Roth, Kopeliovitch 275
Electricité à la ferme (L'), par M. Borlase Matthews 786
Electrification des campagnes en Suède (l'), par M. le Docteur Ekstrom 732

Digitized by Google

PAGES

Electrification rurale dans la région parisienne (l'), par M. Bitouzet . 792
Evolution récente dans la construction du matériel roulant et de l'équipement des tramways électriques (l'), par M. Bacqueyrisse . . . 631
Facteur de puissance (La question du), par M. Foch (communication faite au groupe Sud-Ouest) 119
Facteur de puissance (Divers procédés employés pour l'amélioration du), par M. Delasalle (communications faites au groupe Sud-Ouest) . 119
Production des arcs dans le matériel de traction à courant continu. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller : MM. Roth, Villiers, Leblanc, Charpentier, Courtois. 257
Récupération jusqu'à l'arrêt des trains (la), par M. Guéry. 1131
Sécurité dans les chemins de fer (Le problème de la), par M. Lemonnier 1205
Signalisation dans les Chemins de fer par l'emploi de signaux lumineux de jour et de nuit (Les perfectionnements de la), par M. Prache . 13
Signalisation automatique (considérations générales sur la), par M. Laloy 1223
Supériorité physique de la traction sur rails, par M. Darrieus 318
Système de traction A. D. R. à courant continu, à démarrage sans résistances et à récupération d'énergie, par M. Della Riccia . . . 1089
Traction par accumulateurs, par M. Krieger (communications faites au groupe Sud-Est) 473
Traction par véhicules à accumulateurs, par M. Gasquet 316
Transformation statique du courant continu en courant alternatif. — Discussion du rapport de M. Giroz : MM. Gratzmuller, Touly, Giroz, Demontvignier 301
Transmission à haute tension par les lignes aériennes (Progrès récents aux Etats-Unis dans la), par M. Whitehead. 797
Usages de l'électricité en dehors des heures de pointes (communication faite au groupe Sud-Est), par M. Krieger. 473

2° Travaux des Sections

Essais de câbles à haute tension. 108
(Réponse au Comité électrotechnique néerlandais). . . . . .
Emploi du fil de fer galvanisé pour l'établissement des lignes électriques 239, 470 723
Postes de transformation et postes de distribution automatique. . . 241
Programme des travaux de la Section pour 1927 470
Programme de la Semaine d'octobre 1927. 577
La signalisation et le contrôle automatique des trains sur les voies ferrées d'intérêt général 577
La signalisation sur les réseaux métropolitains. 577
Les postes électriques d'aiguillage 717
La récupération en traction électrique 830

3° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

Alternating current rectification and allied problems, par L. B. W. Jolley *725*
Aluminium dans l'industrie électrique (l'), *Revue de l'aluminium* . . . 475
Consommation et récupération d'énergie sur les tramways et sur les chemins de fer électriques à interstations courtes, par A. Della Riccia 475
Convertitori astatici di corrente elettrica, par Vallauri. *1400*
Distributions et des Canalisations d'électricité, d'eau, de vapeur et de gaz (Traité pratique des), par E. Pacoret. 1399
Identical electrical Networks in series, par A. E. Kennely. 475
Installations électriques à haute et basse tension. — Production, transport, distribution et utilisation de l'énergie électrique, par M. Mauduit. 244
Interrupteurs et disjoncteurs dans l'huile, par P. Pagnon 1477-*1480*
Paratonnerres, par Edwin W. Ligginston 475
Safety rules for the operation of electrical equipment and lines. — Bureau of Standards Washington 596

Digitized by Google

PAGES

Safety rules for the installation and maintenance of Electrical supply and Communication Lines (Bureau of Standards of Washington) 1399
Traction électrique des grandes lignes, par A. Mauduit 596
Traction électrique. Manuel sur la théorie et l'application de la traction électrique aux chemins de fer, par E. E. Seefehlner. . . 479
Traction électrique par courant continu (Modes spéciaux de). Tendances modernes. Traction par accumulateurs. Electrobus. Traction Thermo-électrique, par L. Barbillon 1477

4° Il y a Trente ans

Automobiles électriques, par Hospitalier 598
Coupe-circuits et les fils fusibles, par Laporte 838
Etablissements des canalisations électriques à l'intérieur des habitations, par Bonfante. 249
Système de traction électrique, par Lasnier 598
Traction électrique dans Paris. — Discussion : MM. Marechal, Lauriol, Vuillemier, Mekareski, Vedovelli, Regnard, Bochet et Korda . . 123
Traction mécanique dans Paris, par Franck. 370
Voiture électrique, par Krieger. 123

E. — TELEGRAPHIE. — TELEPHONIE. — TRANSMISSIONS PAR ONDES

1° Communications faites a la Société

Câbles téléphoniques pour les communications interurbaines à grande distance (Utilisation des), par M. Viard. 131
Commandes à distance utilisant comme récepteurs des électro-aimants ou des moteurs à impulsions. — Discussion de la communication de M. Carlini : MM. Damoiseaux, Carlini 335
Commande à distance d'une embarcation, par T. S. F., par M. Chauveau 1410
Champ magnétique au voisinage d'une ligne électrique à courants alternatifs (le), par M. Collet 604
Condensateurs électriques, par M. de Bellescize (communication faite au groupe Sud-Est) 473
Etat actuel de la téléphonie, par M. Mercier (communication faite au groupe Sud-Ouest) 118
Installations exécutées par la Société d'études pour liaisons téléphoniques et télégraphiques à longue distance, par M. L. Cahen. . . 153
Liaisons télégraphiques et téléphoniques dans l'exploitation des distributions d'énergie électrique. — Discussion du rapport de M. Reynaud-Bonin : MM. Neu, Brylinski, Lachat 325
La radiotéléphonie, par J. Fourneau (communication faite au groupe Sud-Est). 473
Systèmes français modernes d'horlogerie électrique, par M. Gosselin . 1253
Téléphonie transatlantique. — La station radiotéléphonique du post-office britannique à Rugby, par M. E.-M. Deloraine 421

2° Travaux des Sections

Un nouveau pavillon renforçateur et diffuseur de son, pour haut-parleur, système « Magunna » 110
La pile thermo-électrique, système Miéville 111
Système de transformateurs à couches cloisonnées et isolées entre elles 112
Appareils J. Carpentier pour les mesures téléphonométriques 114
Observations de M. L. Cahen 116
Ordre du jour de la semaine de discussions d'octobre 1927 242
Problème de jonction en téléphonie automatique 242
La télégraphie harmonique 578

Digitized by Google

PAGES

Les perfectionnements aux triodes à gaz et aux relais à arcs. 580
Les nouvelles applications des cellules photo-électriques basées sur l'emploi d'un éclairage périodique ; application aux instruments de musique 830
Etat actuel des câbles téléphoniques à longue distance 832
Etouffeurs d'échos 832

3° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

Communications à longue distance (Contributions théoriques et pratiques à la technique des), publiées par la S. E. L. T. T. 120 *368*
Die Fernsprechanlagen mit Wahlerbetrieb (Automatische Telephonie), par Fritz Lubberger *246*
Filtres électriques, par Pierre David. *121*
Installations téléphoniques automatiques (Les), par F. Lubberger, traduit par E. Munch 1477
Ondes hertziennes, par Bouasse 1477

4° Il y a trente ans

Télégraphie sans fil, par Preece 838

F. — RECHERCHES PHYSIQUES. — PHYSIOLOGIE

1° Communications faites a la Société

Aciers spéciaux (Les). — Discussion du rapport de M. Jouaust : M. Iliovici. 361
Cellules photo-électriques (Les). — Discussion du rapport de M. Jouaust : MM. Valensi, Jouaust, Toulon. 358
Différences essentielles entre les méthodes des laboratoires de science pure et celles que l'on peut appliquer dans l'industrie, par M. Darmois 1354
Mesure des rayonnements, par M. Ch. Fabry 376
Observations de M. P. Janet 396
Recherche scientifique dans l'industrie en dehors des laboratoires (La), par M. M. Leblanc. 1348
Recherche scientifique de la Société Brown-Boveri (La), par M. Darrieus 1372
Spurenkunde der Elektrizitæt Elecktrophysiographie par Stefan Jellinek 1478
Travail de recherches dans les Sociétés de production et de distribution d'électricité (Le), par M. Imbs. 1358
Travail de recherches dans les Sociétés françaises de construction électrique (Le), par M. Gratzmuller 1361
Travail de recherches à la General Electric C° (Le), par M. Duclert. . 1378
Travaux de recherche industrielle (Quelques observations sur les), par M. Leaute. 1384
Conclusions, par M. Fabry 1388
Une image mécanique d'hystérésis. Note de M. de Bellescize 568

2° Travaux des Sections

Programme de la Semaine d'octobre 1927. 584
Présentation d'un audiomètre. 584

3° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

Aimants, leur calcul et la technique de leurs applications (Les), par M. R.-V. Picou 834
Données numériques d'électricité. Magnétisme et Electrochimie. Extrait du volume V. — Tables annuelles de Constantes et Données numériques. 724
Electricité (L'), par MM. Paul Bunet et Lucien Poincaré 833

Digitized by Google

PAGES
Electrodynamique (Quelques idées sur), par R. Ferrier 1478
Effect of eddy currents in a core consisting of circular wires, par M. Chester Snow 724
Effet Wiedmann considéré comme un cas particulier de la magnétostriction (Contribution à l'étude de l'). Etude théorique et expérimentale, par E. Fromy 834
Influence de l'écrouissage et du recuit sur les propriétés magnétiques de minces fils d'invar, de fer et d'acier, par Mme C. Bieler-Butticaz. *1401*-1477
Linkage-Current Diagram for representing Magneto Operation, par MM. F. B. Silsbee and D. W. Randolph 724
Magnetochimica, par O. Bonazzi *1400*
National Physical Laboratory, — Collected researches 476
Phénomènes diélectriques dans la technique des hautes tensions, par M. F. W. Peek. *247*
Puissances réactives et fictives, par Budeanu 833
Tables annuelles de constantes et données numériques. Données numériques d'électricité, magnétisme et électrochimie, par A. Buffat, G. I. Higson, K. Gordon et Malapert *836*

3° Il y a trente ans

Action physiologique et thérapeutique des courants à haute fréquence, par M. A. d'Arsonval. 481
Effet Edison, par Fléming 249

G. — APPAREILS ET METHODES DE MESURES

1° Communications faites a la Société

Erreur introduite par les transformateurs dans la mesure d'une puissance et d'une énergie, par M. Iliovici 1313
La mesure des hautes tensions. — Discussion du rapport de M. de la Gorce : M. Bellon 362
Mesure des faibles angles de déphasage et nouveaux procédés pour les déterminer, par M. Vassilière-Arlhac 1330
Mesure du facteur de puissance d'un circuit triphasé non équilibré. — Discussion du rapport de M. Genkin : MM. Stokvis, Iliovici, Pestarini, Genkin 345
Mesure indirecte de l'énergie réactive. — Discussion du rapport de M. Genkin : MM. Iliovici, Genkin 354

2° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

Essais de machines (Les), par M. Royds 366
Mesures électriques, par M. J. Granier 176 *837*
Physiciens hollandais et la méthode expérimentale en France au XVIIe siècle (Les), par M. Pierre Brunet 243, *247*
Pratique des essais de machines (La), par M. Boyer-Guillon. 724
The National Physical Laboratory. Report'for the Year 1926. . . . 1478

1° Il y a trente ans

Nouveaux voltmètres et ampèremètres enregistreurs à sensibilité variable, par R. Arnoux. 726
Rhéographe à induction Abraham-Carpentier, par M. Abraham. . . 838
Voltmètre électrostatique interférentiel pour étalonnage, par Pérot . 726

Digitized by Google

H. – METEOROLOGIE

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

PAGES

Annales de l'Institut de Physique du Globe, — publiées par les soins de Ch. Maurain 120
Annales de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris et du Bureau central de Magnétisme terrestre, par Ch. Maurain . 834

I. — MATHEMATIQUE. — MECANIQUE RATIONNELLE MECANIQUE APPLIQUEE

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

De la mécanique classique à la relativité naturelle, par M. Juppont . 833
Eléments de thermodynamique, par A. Turpain. 476
Initiation aux progrès récents de la mécanique des fluides. Leur relation avec l'électrodynamique, par M. G. Darrieus 476
Leçons choisies de mécanique, par M. A. Boulanger 833
La véritable géométrie d'Euclide et la relativité d'Einstein, M. Juppont 833
Leçons de cinématique, par M. Raoul Bricard. 476
Mathématiques (Les Fondements des). De la géométrie d'Euclide à la relativité générale et à l'Intuitionisme, par le Docteur F. Gonseth 243, *247*
Quelques propriétés d'un triangle de nombres impairs, par M. Juppont 833

J. — CONGRES — EXPOSITION. — ACTES OFFICIELS ANNUAIRES. — ETUDES ECONOMIQUES. — INVENTAIRES STATISTIQUES. — COMMEMORATIONS

Communications faites a la Société

Note technique sur la visite de la S. F. E. aux Installations électriques des Mines du Nord et du Pas-de-Calais, par M. Drouin. 800

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

Annuaire Electrotechnique Tschécoslovaque pour 1927. . . . . *1402*
Annuaire 1927 de l'American Institute of Electrical Engineers. . . . 595
Annuaire 1926 de l'Union des syndicats de l'électricité 366, *368*
Annuaire pour l'an 1927, publié par le Bureau des Longitudes . . 243, *480*
Bases rationnelles de la Documentaire industrielle (Les). Un répertoire de la production française, par M. Georges Dubujadoux. . . 476 *480*
Conférence de l'organisation française. L'organisation scientifique, 2me Congrès de Paris 1924 476
Conférence mondiale de l'Energie (La). Compte rendu de la session spéciale de Bâle (1926), par M. C. D. Busila. 477
Compte rendu du XXe Congrès international de tramways, de chemins de fer d'intérêt local et de transports publics automobiles. . . . 834
Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences (Table générale des) 1478
Electrocution (Haute et basse tension) (Pour éviter l'), par M. Roussel Groupement amical des Amateurs de T. S. F. de Valenciennes . . 724
Hauts salaires (Les), par F. Bayle. 1478
Jahrbuch der Electrotechnik, Dr. von Karl Srecker 477
Laval centrifugal Review, tomes I à VI 834
Le Livre d'Or de l'industrie du caoutchouc, *Revue générale du caoutchouc* 477
Maschinenfabrik-Oerlikon 1876-1926 1478
Pour éviter l'électrocution (haute et basse tension), par M. Roussel . 1478
Principe d'organisation scientifique, par Frédéric Winslow Taylor . . 834
Société d'électricité de Guebviller et ses environs 243
Statistik der Elektrizitatswerke und der Elecktrishen Bahnen Oeste reichs ; *Elektrottechnischen verein esin Wien* 477
Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker 834

Digitized by Google

K. — FORMULAIRES. — AIDE-MEMOIRES. — MANUELS

PAGES

Aide-mémoire. — Formulaire de l'électricité, de la mécanique et de l'électro-mécanique, par M. E. Pacoret 243
Aide-mémoire du Radio-Club de France, par M. A. Givelet 243 *246*
Manuel de la classification décimale à l'usage des ingénieurs électriciens, par M. E. Beinet 366
Pour recharger ses accus sur le secteur. Comment construire soi-même le meilleur des redresseurs de courants alternatifs, par M. C. Rialland 475
Traction électrique. — Manuel sur la théorie et l'application de la traction électrique aux chemins de fer, par M. Seefehlner . . 366, *367*

L. — COMMUNICATIONS ET INFORMATIONS DIVERSES

Allocution de M. Legouez, président sortant 10
Allocution de M. Fabry, président entrant 11
Allocution de M. Legouez à la séance d'ouverture de la semaine d'octobre 1926 37
Annonces diverses 254
Assemblées générales annuelles du :
8 janvier 1927 6
2 avril 1927 372
Attribution de la Médaille Mascart pour 1927 232
Conférences du Comité consultatif international des communications téléphoniques à grande distance 1397
Distinctions obtenues par les Membres de la Société 9 254 374 602 729 1327 1407
Dons au Laboratoire 128 253 729
Dons à la Société 128 253 373 487 1327
Dons à l'Ecole 1407
Errata 229 230 488 1329
Fondation d'une bourse Frantz Hueber 232
Inauguration de l'Ecole supérieure d'électricité : 1394
Membres décédés 9 128 1408
Membres titulaires . . . 6 127 253 373 487 600 728 1326 1406
Principales décisions du bureau 231 441
Principales décisions du Comité 232 708
Prix triennal Georges Montefiore 364
Rapport annuel sur le Laboratoire central et l'Ecole supérieure d'électricité 505
Rapport de la Commission des comptes 492
Rapport du Comité d'administration 489
Remise de la Médaille Mascart à Sir J. J. Thomson 708
Remise à M. P. Janet du produit de la souscription pour la création d'une bourse d'études 1149
Renouvellement partiel du Bureau et du Comité 92
Réunion ordinaire mensuelle du :
8 janvier 1927 6
5 février 1927 127
5 mars 1927 253
2 avril 1927 372
Réunion supplémentaire du 29 avril 1927, commune avec la Société des Ingénieurs civils de France 484
Réunion ordinaire mensuelle du :
4 mai 1927 486
1er juin 1927 600
6 juillet 1927 728
5 novembre 1927 1326
3 Décembre 1927 1406
Réunion du Conseil d'administration et de l'Assemblée générale de la Société pour favoriser le développement du haut enseignement de l'Electrotechnique en France 94 708
Sixième assemblée plénière de la C. E. I. en septembre 1927 232

Digitized by Google

PAGES

Visite des centres de labourage de la Société électrique de travaux agricoles et d'une des usines de la Société française des poteaux électriques 441
Visite au Studio Abel Gance (25 mars 1927) 463
Visite aux installations de signalisation automatique de la Cie du Chemin de fer du Nord 1395
Visite de l'Exposition de T. S. F. 1396
Voyage dans les Mines du Nord et du Pas-de-Calais 800

Il y a Trente ans

Assemblée générale extraordinaire du 10 novembre 1897 1404
Réunion ordinaire mensuelle du 10 novembre 1897 1404

Digitized by Google

Table des noms d'auteurs

CITES DANS LE TOME VII (4e SERIE)

Communications faites à la Société, p. 1493.
Ouvrages offerts à la Société et Bibliographie, p. 1497.
Il y a trente ans, p. 1500.
Il y a soixante ans, p. 1500.

Communications faites a la Société.

PAGES

Audibert. — L'emploi de l'électricité dans les travaux souterrains des mines grisouteuses 398
Bacqueyrisse. — L'évolution récente dans la construction du matériel roulant et de l'équipement des tramways électriques 631
Belfils. — Discussion du rapport de M. Ricalens sur les pertes dans les machines électriques 54
Bellescize (de). — Les condensateurs électriques (communication faite au Groupe Sud-Est 473
Bellescize (de). — Une image mécanique de l'hystérésis 568
Bellon. — Discussion du rapport de M. de la Gorce sur la mesure des hautes tensions 362
Benard. — Discussion du rapport de M. Marsat sur les appareils d'éclairage pour aviation 189
Benard. — Comparaison entre les systèmes à optique et les systèmes à miroir 194
Bichet. — Discussion du rapport de M. Féry sur la théorie des accumulateurs au plomb 228
Bitouzet. — L'électrification rurale dans la région parisienne 792
Blondel (A.) — Considérations sur l'établissement des aérophares . . 203
Blondin. — Discussions du rapport de M. le Dr Couvreux sur l'éblouissement visuel 171
Brandt. — Discussion du rapport de M. Wetzel sur l'utilisation de la lumière dans les appareils d'éclairage public 170
Brandt. — Discussion du rapport de M. Marsat sur les appareils d'éclairage pour aviation 181
Brillie. — L'arc électrique de soudure 1065
Brylinski. — Discussion du rapport de M. Reynaud-Bonin sur les liaisons télégraphiques et téléphoniques dans l'exploitation des distributions d'énergie électrique 327
Bunet. — Discussion du rapport de M. Fallou « une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs » 71
Bunet. — Discussion du rapport de M. Curmer sur la fabrication du carbure de calcium et de la cyanamide 215
Bunet. — Discussion du rapport de M. Sarrot du Bellay sur les installations électrolytiques d'hydrogène en vue d'utiliser au maximum la puissance d'une centrale électrique 229
Bunet. — Facteur de puissance des fours à induction 465 807
Cahen (L). — Installation exécutée par la Société d'Etudes pour liaisons télégraphiques et téléphoniques à longue distance 153
Carlini. — Discussion de son rapport sur les commandes à distances utilisant comme récepteurs des électro-aimants ou des moteurs à impulsion 340

Digitized by Google

PAGES

CHARPENTIER. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller sur la production des arcs dans le matériel de traction à courant continu . . 268
CHARPENTIER. — Discussion de son rapport sur la définition du pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile 279
COLLET. — Le champ magnétique au voisinage d'une ligne électrique à courants alternatifs 604
CONINCK (de). — Discussion de son rapport sur les avantages comparés de l'électrification appliquée aux voies ferrées ou aux véhicules automobiles sur route au point de vue de l'économie nationale . . 319
CORDIER. — Discussion du rapport de M. Levasseur sur l'utilisation des fours électriques dans la fonderie des alliages et des métaux non ferreux 222
COUREL. — Les postes électriques d'aiguillage 717
CHAUVEAU. — Commande à distance d'une embarcation, par T. S. F. 1410
COURTOIS. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller sur la production des arcs dans le matériel de traction à courant continu . . . 275
COUVREUX. — Discussion de son rapport sur l'éblouissement visuel . 172
COUVREUX. — Discussion du rapport de M. Marsat sur les appareils d'éclairage pour aviation 191
DAMOISEAUX. — Discussion du rapport de M. Carlini sur les commandes à distance utilisant comme récepteurs des électro-aimants ou des moteurs à impulsion 335
DARMOIS. — Différences essentielles entre les méthodes des laboratoires de science pure et celles que l'on peut appliquer dans l'Industrie . 1354
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Berger sur les machines à collecteur 45
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Fallou « une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs 85
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Genkin sur les procédés statiques d'équilibrage d'une charge monophasée dans un réseau triphasé 90
DARRIEUS. — Discussion du rapport de MM. Bergeon et Bunet sur « les fours d'électrochimie » 215
DARRIEUS. — Discussion du rapport de M. Curmer, sur la fabrication du carbure de calcium et de la cyanamide 218
DARRIEUS. — Supériorité physique de la traction sur rails 318
DARRIEUS. — La recherche scientifique de la Société Brown-Boveri . 1372
DEBIONNE. — Note sur le Block automatic Beaumont-Creil 1391
DELASALLE. — Divers procédés employés pour l'amélioration du facteur de puissance (communication faite au groupe Sud-Ouest) 119
DELLA RICCIA. — Système de traction A. D. R. à courant continu, à démarrage sans résistances et à récupération d'énergie 1089
DELORAINE. — Téléphonie transatlantique. — La station radio-téléphonique du Post-Office britannique à Rugby 421
DELVAUX. — Présentation d'un audiomètre 584
DEMONTVIGNIER. — Discussion du rapport de M. Giroz sur la transformation statique du courant continu en courant alternatif . . 310
DESARCES. — Discussion du rapport de M. Wetzel sur l'utilisation de la lumière dans les appareils d'éclairage public 166
DESSUS. — Discussion du rapport de M. Fallou « une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs 87
DROUIN. — Note technique sur la visite de la S. F. E. aux installations électrifiées des Mines du Nord et du Pas-de-Calais 800
DUCLERT. — Le Travail de recherches à la General Electric Cº . . . 1378
EKSTROM. — L'électrification des campagnes en Suède 732
FABRY (Ch.). — Mesure des rayonnements 376
FALLOU. — Discussion de son rapport « une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs . . . 83
FALLOU. — Discussion du rapport de M. Charpentier sur la définition du pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile 280
FERY. — Note à propos de la communication de M. Jumeau sur les accumulateurs électriques. 1446

Digitized by Google

PAGES

FOCH. — La question du facteur de puissance. Communication faite au Groupe Sud-Ouest 119
FOURCAULT. — Discussion du rapport de M. de Coninck sur les avantages comparés de l'électrification appliquée aux voies ferrées ou aux véhicules automobiles sur routes au point de vue de l'économie nationale 311
FOURNEAU (J.). — La radiotéléphonie. (Communication faite au Groupe S. E.) 473
FRANCK. — Discussion du rapport de M. Marsat sur les appareils d'éclairage pour aviation 179 191
GASQUET. — Discussion de la communication de M. Jumau sur les accumulateurs Ironclad 224
GASQUET. — Traction par véhicules à accumulateurs 316
GENKIN. — Discussion de son rapport sur les procédés statiques d'équilibrage d'une charge monophasée dans un réseau triphasé 91
GENKIN. — Discussion du rapport de MM. Bergeon et Bunet sur les « fours d'électrochimie » 213
GENKIN. — Discussion du rapport de M. Fallou sur le calcul du courant de court circuit dans les réseaux triphasés 296
GENKIN. — Discussion de son rapport sur la mesure du facteur de puissance d'un circuit triphasé non équilibré 352
GENKIN. — Discussion de son rapport sur la mesure indirecte de l'énergie réactive 357
GIRAULT. — Discussion du rapport de M. Fallou « une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs 74
GIRAULT. — Discussion de la communication de M. Jumau sur les accumulateurs Ironclad 225
GIROZ. — Discussion de son rapport sur la transformation statique du courant continu en courant alternatif 307 309
GOSSELIN. — Systèmes français modernes d'horlogerie électrique . . . 253
GRATZMULLER. — Discussion du rapport de M. Berger sur les machines à collecteur 38 50
GRATZMULLER. — Discussion du rapport de M. Ricalens sur les pertes dans les machines électriques 68
GRATZMULLER. — Discussion du rapport de M. Fallou sur le calcul du courant de court-circuit dans les réseaux triphasés 301
GRATZMULLER. — Discussion du rapport de M. Giroz sur la transformation statique du courant continu en courant alternatif . . 302 307
GRATZMULLER. — Discussion du rapport de M. de Coninck sur les avantages comparés de l'électrification appliquée aux voies ferrées de construction ou aux véhicules automobiles sur routes au point de vue de l'économie nationale. 316-319 323
GRATZMULLER. — Le travail de recherches dans les Sociétés Françaises électrique 1361
GUÉRY. — La récupération jusqu'à l'arrêt des trains 1131
GUTMANN. — Discussion du rapport de M. Levasseur sur l'Utilisation des fours électriques dans la fonderie des alliages et des métaux non ferreux 222
HERRY. — Comment produire gratuitement un kWh de 3.000 calories ? 520
ILIOVICI. — Discussion du rapport de M. Ricalens sur les pertes dans les machines électriques 68
ILIOVICI. — Discussion du rapport de M. Genkin sur les procédés statiques d'équilibrage d'une charge monophasée dans un réseau triphasé 89
ILIOVICI. — Discussion du rapport de M. Fallou sur le calcul du courant de court-circuit dans les réseaux triphasés 298
ILIOVICI. — Discussion du rapport de M. Genkin sur la mesure du facteur de puissance d'un circuit triphasé non équilibré 348 352
ILIOVICI. — Discussion du rapport de M. Genkin sur la mesure indirecte de l'énergie réactive 354
ILIOVICI. — Discussion du rapport de M. Jouaust sur les aciers spéciaux 361
ILIOVICI. — Erreur introduite par les transformateurs dans la mesure d'une puissance et d'une énergie 313

Digitized by Google

PAGES

IMBS. — Le travail de recherches dans les Sociétés de production et de distribution d'électricité 1358
JANET. — Observations au rapport de M. Fabry sur la mesure des rayonnements 396
JOUAUST. — Discussion de son rapport sur les cellules photo-électriques 358 360
JUMAU. — Discussion du rapport de M. Féry sur la théorie des accumulateurs au plomb 228
JUMAU. — Les accumulateurs électriques. (Communication présentée au groupe Sud-Est de la S. F. E.) 1430
KLONINGER. — Discussion du rapport de M. Charpentier sur la définition de pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile 278
KOPELOVITCH. — Discussion du rapport de M. Fallou « une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs. 78
KOPELIOVITCH. — Discussion du rapport de M. Charpentier sur la définition du pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile 288
KOPELIOVITCH. — Discussion du rapport de M. Fallou sur le calcul du courant de court-circuit dans les réseaux triphasés 301
KRIEGER. — Usage de l'électricité en dehors des heures de pointe (communication faite au groupe Sud-Est). 473
KRIEGER. — La traction électrique par accumulateurs (communication faite au groupe S. E.) 473
LACHAT. — Discussion du rapport de M. Reynaud-Bonin sur les liaisons télégraphiques et téléphoniques dans l'exploitation des distributions d'énergie électrique 328
LALOY. — Considérations générales sur la signalisation automatique . 1223
LANGLOIS et LETRILLART. — Fonctionnement en régime amorcé d'une génératrice asynchrone isolée 973
LANGUEPIN. — La soudure électrique 1031
LAPORTE. — Observations à la communication de M. Parodi sur l'Usine d'Eguzon et l'électrification du réseau d'Orléans 566
LEAUTE. — Quelques observations sur les Travaux de recherches industrielles. 1384
LEBLANC (Maurice). — Discussion du rapport de M. le Dr Couvreux sur l'éblouissement visuel 173
LEBLANC (Maurice). — Discussion du rapport de M. Marsat sur les appareils d'éclairage pour aviation 179
LEBLANC. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller sur la production des arcs dans le matériel de traction à courant continu 263
LEBLANC. — La recherche scientifique dans l'Industrie en dehors des laboratoires 1348
LE MONNIER. — Le problème de la sécurité dans les chemins de fer . . 1205
LE MONNIER. — Discussion du rapport de M. Ricalens sur les pertes dans les machines électriques. 61
LE MONNIER. — Signification physique de la tension de réactance dans les machines à champ tournant 709
LEVASSEUR. — Réponse à la note des Etablissements Marshall au sujet de son rapport sur les fours électriques 223
MAISONNEUVE. — Discussion du rapport de M. Wetzel sur l'Utilisation de la lumière dans les appareils d'éclairage public 166
MARIES. — Discussion du rapport de M. Levasseur sur l'Utilisation des fours électriques dans la fonderie des alliages et des métaux non ferreux 218 222
Etablissements MARSHALL. — Note au sujet du rapport de M. Levasseur sur l'Utilisation des fours électriques dans la fonderie des alliages et des métaux non ferreux 223
MATHIEU (Marcel). — Systèmes de réglage des fours électriques à résistance et à arcs 1007
MATHIVET. — Observations à la communication de M. Audibert sur l'emploi de l'électricité dans les travaux souterrains des mines grisouteuses 418
MATHIVET. — Comparaison entre le courant continu et le courant alternatif 1237

Digitized by Google

PAGES

MATIGOT. — Discussion du rapport de M. Wetzel sur l'utilisation de la lumière dans les appareils d'éclairage public 168
MATIGOT. — Discussion du rapport de M. le Docteur Couvreux sur l'éblouissement visuel 172
MATTHEWS (Borlase). — L'électricité à la ferme 786
MERCIER. — Etat actuel de la téléphonie. (Communication faite au Groupe S.-O.) 118
MERCIER. — Note au sujet de la communication de M. Herry : Comment produire gratuitement un kWh de 3.000 calories ? 520
NEU. — Discussion du rapport de M. Reynaud-Bonin sur les liaisons télégraphiques et téléphoniques dans l'exploitation des distributions d'énergie électrique 325
NEU. — Observations à la communication de M. Audibert sur l'emploi de l'électricité dans les travaux souterrains des mines grisouteuses 419
PARODI. — L'usine d'Eguzon et l'électrification du réseau d'Orléans . . 547
PESTARINI. — Discussion du rapport de M. Genkin sur la mesure du facteur de puissance d'un circuit triphasé non équilibré 351
PESTARINI. — Une butée magnétique 457
PISTOYE (de). — Discussion du rapport de M. Fallou « une nouvelle contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs » 72
PRACHE. — Les perfectionnements de la signalisation dans les Chemins de fer par l'emploi de signaux lumineux de jour et de nuit 13
RENARD (Colonel). — Discussion du rapport de M. Marsat sur les appareils d'éclairage pour aviation 177
RICALENS. — La forme d'onde de la tension en charge dans les alternateurs 969
RIEUNIER. — Liaisons entre réseau à fréquences différentes 95
ROTH (A.). — Discussion du rapport de M. Gratzmuller sur la production des arcs dans le matériel de traction à courant continu . . 257
ROTH (A.). — Discussion du rapport de M. Charpentier sur la définition du pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile 286
ROTH (E.). — Discussion du rapport de M. Ricalens sur les pertes dans les machines électriques 51
ROTH (E). — Etude analytique de l'échauffement des machines électriques 840
SAINT-GERMAIN. — Discussion du rapport de M. Charpentier sur la définition du pouvoir de coupure des disjoncteurs à huile . . 275 285
STOKVIS. — Discussion du rapport de M. Genkin sur la mesure du facteur de puissance d'un circuit triphasé non équilibré 345
TOULON. — Discussion du rapport de M. Jouaust sur les cellules photo-électriques 358
TOULY. — Discussion du rapport de M. Giroz sur la transformation statique du courant continu en courant alternatif 302 307
VALENSI. — Discussion du rapport de M. Jouaust sur les cellules photo-électriques 358
VASSILIÈRE-ARLHAC. — Mesure des faibles angles de déphasage et nouveaux procédés pour les déterminer 1330
VIARD. — Câbles téléphoniques pour les communications interurbaines à grande distance (Utilisation des) 131
VILLIERS. — Discussion du rapport de M. Gratzmuller sur la production des arcs dans le matériel de traction à courant continu 262
VUIGNER. — Discussion du rapport de M. Levasseur sur l'utilisation des fours électriques dans la fonderie des alliages et des métaux non ferreux 221
WETZEL. — Discussion de son rapport sur l'utilisation de la lumière dans les appareils d'éclairage public 167
WHITEHEAD (J.-B.). — Progrès récents aux Etats-Unis dans la transmission à haute tension par les lignes aériennes 797

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

ACADÉMIE DES SCIENCES. — Table générale des comptes rendus des séances de l'Académie 1478

Digitized by Google

PAGES

American institute of electrical engineers. — Year Book 1927 . 595
Archibald. — Polyphase Induction Motors *121*
Association électrotechnique Tchécoslovaque *1402*
Barbillon. — Les alternateurs industriels 724
Barbillion (L.). — Modes spéciaux de traction électrique par courant continu. Tendances modernes. Traction par accumulateurs. Electrobus. Traction Thermo-électrique. 1477
Bardin R. — Les groupes électrogènes. *1400*
Bayle. — Les hauts salaires 1478
Beinet (E.). — Manuel de la classification décimale à l'usage des ingénieurs électriciens. 366
Bieler-Butticaz (Mme C.). — Influence de l'écrouissage et du recuit sur les propriétés magnétiques de minces fils d'invar, de fer et d'acier *1401* 1477
Bonazzi. — « Magnetochimica » *1402*
Bouasse. — Ondes Hertziennes 1477
Boulanger (A.). — Leçons choisies de mécanique. 833
Boyer-Guillon. — La pratique des Essais de machines 724
Bricard (Raoul). — Leçons de cinématique. 476
Brunet. — Les physiciens hollandais et la méthode expérimentale en France au XVIIe siècle. 243 *247*
Budeanu. — Puissances réactive et fictive 833
Budeanu. — Les différentes conceptions et opinions concernant la notion de puissance réactive en régime non sinusoïdal . . . 833
Buffa (A.), Higson (G.-I.), Gordon (K.) et Malapert. — Tables annuelles de constantes et données numériques 836
Bunet (Paul), Poincaré (Lucien). — L'électricité. 833
Bureau des longitudes. — Annuaire pour l'an 1927 . . . . . 243, *480*
Bureau of standards of Washington. — Safety rules for the operation of electrical equipment and lines. *596*
Bureau of standards of Washington. — Safety rules for the installation and maintenance of électrical supply and Communication Lines . . . . . .
Bureau of Standards of Washington. — Magnetic Testing. . . . 1399
Busila (C.-D.). — La Conférence mondiale de l'énergie. Compte rendu de la session spéciale de Bâle (1926) 477
Carton (R.), Dumartin. — La transformation de l'Energie électrique, tome I transformateur 595 *835*
Castex (F.). — Accumulateurs électriques 1399 1479
Chester snow. — Effect of eddy currents in a core consisting of circular wires 724
Cordier (F.). — Chaudières et Condenseurs. 1399
Courau (R.) et Besson (Henri). — Utilisation rationnelle des combustibles. Distillation des combustibles à basse température . . . 1399
Darrieus. — Initiation aux progrès récents de la Mécanique des fluides. Leur relation avec l'Electrodynamique 476
David (Pierre). — Filtres électriques. *121*
Della Riccia (A.). — Consommation et récupération d'énergie sur les tramways et sur les chemins de fer électriques à interstations courtes 475
Dubujadoux (Georges). — Les bases rationnelles de la Documentation Industrielle 476 *480*
Duval (Charles-L.). — Usines hydroélectriques *478*
Elektrotechnischen vereines in Wien. — Statistik der Elecktrizitatswerke und der Elektrischen Bahnen Oeste reichs. 477
Ferrier (R.). — Quelques idées sur l'électrodynamique 1478
Fromy (E.). — Contribution à l'étude de l'effet Wiedemann considéré comme un cas particulier de la magnétostriction 834
Foulcher. — La cuisine domestique à l'électricité *122*
Givelet. — Aide-mémoire du Radio-Club de France. 243 *246*
Gonseth. — Les fondements des mathématiques. De la géométrie d'Euclide à la Relativité générale et à l'Intuitionisme. . . 243 *247*
Granier (Jean). — Mesures électriques. 476-*837*

Digitized by Google

PAGES

GROUPEMENT AMICAL DES AMATEURS DE T.S.F. DE VALENCIENNES. . 724
GUTTON. — Génératrices de courants et moteurs électriques. — Introduction à l'étude de l'électrotechnique appliquée. 366 *367*
JELLINEK (Stephan). — Spurenkunde der Elektrizität Elektraphysiographie 1478
JOLLEY (L. B. W.). — Alternating current rectification and allied problems *725*
JUPPONT. — Quelques propriétés d'un triangle de nombres impairs . 833
JUPPONT. — La véritable Géométrie d'Euclide et la Relativité d'Einstein 833
JUPPONT. — De la mécanique classique à la relativité naturelle . . . 833
KENNELY (A.-E.). — Identical electrical Networks in series. . . . 475
LANGLOIS (Richard). — Machines asynchrones à champs tournants à bagues et à collecteur 120 *244*
LAVAL CENTRIFUGAL REVIEW. — Revue bimestrielle, tomes I à VI 1921-1927 834
LIGGINSTON (E.-W.). — Paratonnerres 475
LUBBERGER (Fritz). — Die Fernsprechanlagen mit Wahlerbetrieb (Automatische Telephonie) *246*
MARZOLO FRANCESCO. — Utilizzazioni di forze idrauliche Impianti idroelettrici 475
MATHIEU (M.). — Transformateurs de puissance. Calculs, constructions. Applications industrielles. Bobines d'inductance 595 *835*
MAUDUIT. — Installations électriques à haute et basse tension. — Production, transport, distribution et utilisation de l'énergie électrique *244*
MAUDUIT. — Traction électrique des grandes lignes *596*
MAURAIN (Ch.). — Annales de l'Institut de Physique du Globe, tome IV 120
MAURAIN (Ch.). — Annales de l'Institut de Physique du Globe de l'Université de Paris et du Bureau central de Magnétisme terrestre, tome V 834
MONTAGNE (E.). — La mesure des débits et l'aménagement des usines hydrauliques 1399 1479
MUNCH. — Les Installations téléphoniques automatiques, traduction de l'ouvrage de Lubberger 1477
NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. — Collected researches 476
NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. — Report for the Year 1926. . . 1478
ORGANISATION SCIENTIFIQUE. 2me CONGRÈS PARIS 1924. — Conférence de l'Organisation française 476
PACORET. — La technique de la houille blanche et des réseaux et usines hydro-électriques *121*
PACORET. — Aide-mémoire. — Formulaire de l'électricité, de la mécanique et de l'électro-mécanique 243 *1401*
PACORET (E.). — Traité pratique des Distributions et des Canalisations d'Electricité, d'eau, de vapeur et de gaz 1399
PAGNON (P.). — Interrupteurs et disjoncteurs dans l'huile. . . 1477 *1480*
PEEK (F.-W.). — Phénomènes diélectriques dans la technique des hautes tensions. *247*
PETRESCO. — Considération sur l'auto-excitation des alternateurs branchés aux lignes de haute tension. 833
PICOU (R.-V.). — Les aimants, leur calcul et la technique de leurs applications 834
PONSINET (J.). — Principes de l'Electrochimie 595 *836*
RALLIAND (C.). — Pour recharger ses accus sur le secteur. Comment construire soi-même le meilleur des redresseurs de courants alternatifs 475
REVUE DE L'ALUMINIUM. — L'aluminium dans l'industrie électrique . 475
REVUE GÉNÉRALE DU CAOUTCHOUC. — Le Livre d'Or de l'industrie du caoutchouc 477
ROYDS. — Les essais de machines. 366
ROUSSEL. — Pour éviter l'électrocution haute et basse tension . . . 1478
SEEFEHLNER. — Traction électrique. — Manuel sur la théorie et l'application de la traction électrique aux chemins de fer. . 366 *367*

Digitized by Google

PAGES

SILSBEE (F.-B. and D. W.)RANDOLPH. — Linkage-Current diagram for representing Magneto Operation 724
SOCIÉTÉ D'ÉLECTRICITÉ DE GUEBWILLER ET SES ENVIRONS. — Exposé historique de la Société. 243
SOCIÉTÉ D'ÉTUDES POUR LIAISONS TÉLÉPHONIQUES ET TÉLÉGRAPHIQUES A LONGUE DISTANCE. — Contributions théoriques et pratiques à la technique des communications à longue distance. 120 *368*
SOCIÉTÉ ŒRLIKON. — Maschinenfabrik Œrlikon 1478
SRECKER (Dr von Karl). — Jahrbuch der Electrotechnik. 477
TABLES ANNUELLES DE CONSTANTES ET DONNÉES NUMÉRIQUES. — Données numériques d'Electricité, Magnétisme et Electrochimie. Extrait du volume V. 724
TAYLOR (Frédéric Winslow). — Principes d'organisation scientifique 834
TORICES. — Schémas et règles pratiques de bobinage des Machines électriques 834 1399 *1400*
TURPAIN (A.). — Eléments de thermodynamique 476
UNION DES SYNDICATS DE L'ÉLECTRICITÉ. — Annuaire 1926. . . 366 *368*
UNION INTERNATIONALE DE TRAMWAYS DE CHEMINS DE FER D'INTÉRET LOCAL ET DE TRANSPORTS PUBLICS AUTOMOBILES. — Compte rendu du XXme Congrès 834
VALLAURI. — Convertitori statici di corrente elettricia. *1400*
VORSCHRIFTENBUCH DES VERBANDES DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER 834

3° IL Y A TRENTE ANS

ABRAHAM. — Rhéographe à induction Abraham-Carpentier. 838
ARNO (Riccardo). — Théorie analytique de sa méthode de démarrage des moteurs asynchrones 1404
Discussion : MM. M. LEBLANC, KORDA, Ed. GUILLAUME . . 1404
ARNOUX (R.). — Nouveaux Voltmètres et ampèremètres enregistreurs à sensibilité variable 726
ARSONVAL (d'). — Action physiologique et thérapeutique des courants à haute fréquence. 481
BLANCHON. — L'accumulateur Tudor à charge rapide 370
BOCHET. — La traction électrique dans Paris 124
BONFANTE. — Etablissements des canalisations électriques à l'intérieur des habitations 249
CLAUDE (Georges). — Réglage des lampes à arc à courant alternatif . 726
COLIN. — Chauffage et cuisine électrique. 248
FLEMING. — Effet Edison. 249
FRANCQ. — Traction mécanique dans Paris. 370
HOSPITALIER. — Automobiles électriques 598
KRIEGER. — Voiture électrique 123
KORDA. — La traction électrique dans Paris 124
LAPORTE. — Les coupe-circuits et les fils fusibles 838
LASNIER. — Système de traction électrique. 598
LAURIOL. — La traction électrique dans Paris. 124
MARÉCHAL. — La traction électrique dans Paris. 123
MARKS (Docteur). — Sur l'arc électrique en vase clos (discussion) . . 248
MEKARESKI. — La traction électrique dans Paris 124
PEROT. — Voltmètre électrostatique interférentiel pour étalonnage. . 726
PREECE. — Télégraphie sans fil 838
REGNARD. — La traction électrique dans Paris 124
VEDOVELLI. — La traction électrique dans Paris. 124
VUILLEUMIER. — La traction électrique dans Paris. 124

IL Y A SOIXANTE ANS

SIEMENS C.-W. — Réalisation d'une nouvelle machine magnéto-électrique 1404

L'Imprimeur-Editeur : Etienne CHIRON, Paris.

Digitized by Google

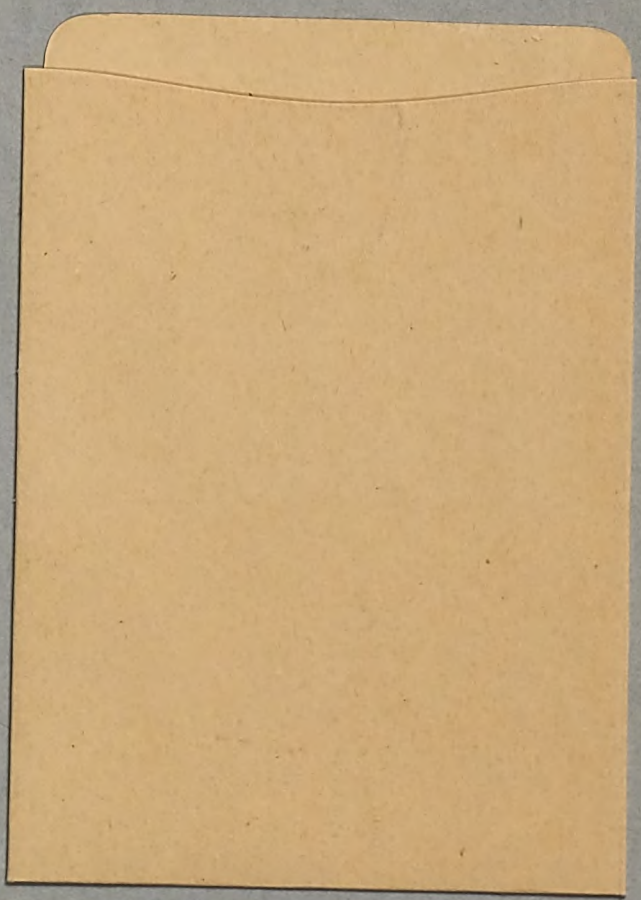
Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Date Due

Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google